N° d'ordre : 66

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE BESANÇON

POUR OBTENIR

LE DIPLOME DE DOCTEUR DE 3° CYCLE SPÉCIALITÉ GÉOLOGIE APPLIQUÉE

PAR

Daniel RÉMONT
Licencié ès-Sciences

THÈSE

QUELQUES PROPRIÉTÉS DES SÉDIMENTS ARGILEUX JURASSIQUES

Essai de Corrélations entre leurs Caractéristiques Géologiques et Géotechniques

---

Soutenue le 25 NOV 1967, devant la Commission d'Examen

JURY : MM. **DREYFUSS,** Professeur — Président
THÉOBALD, Professeur — Examinateurs
THIEBAUT, Professeur — Examinateurs

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547627_0012

N° d'ordre : 66

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE BESANÇON

POUR OBTENIR

LE DIPLOME DE DOCTEUR DE 3° CYCLE SPÉCIALITÉ GÉOLOGIE APPLIQUÉE

PAR

Daniel RÉMONT

Licencié ès-Sciences

THÈSE

QUELQUES PROPRIÉTÉS DES SÉDIMENTS ARGILEUX JURASSIQUES

Essai de Corrélations entre leurs Caractéristiques Géologiques et Géotechniques

---

Soutenue le 25 NOV. 1967, devant la Commission d'Examen

JURY : MM. **DREYFUSS,** Professeur — Président

THÉOBALD, Professeur — Examinateurs

THIEBAUT, Professeur — Examinateurs

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

UNIVERSITE DE BESANCON

FACULTE DES SCIENCES

Doyen Honoraire : M. GLANGEAUD

Professeurs Honoraires : MM. BAILLAUD, DUFFIEUX, THIRY
TRILLAT, UEBERSFELD,
VINCENSINI

Maitre de Conférence Honoraire : M. GRANIER

DOYEN : M. JACQUEMAIN : Chimie Appliquée

ASSESSEUR : M. MESNAGE : Chronométrie

PROFESSEURS : MM. TRONCHET : Botanique
CHATELET : Mathématiques
PERROT : Chimie Générale
DREYFUSS : Géologie - Minéralogie
THEOBALD : Paléontologie et géologie stratigraphique
QUANTIN : Botanique
CHALEAT : Mécanique Appliquée
NAHON : Mécanique générale
BERNARD : Chimie - Physique
RIPPLINGER : Physiologie Animale
RIGAL : Calcul Numérique
VIENOT : Physique
THIEBAUT : Géologie - Minéralogie
GOMOT : Zoologie
PLUVINAGE : Physique Théorique
ARBEY : Astronomie
GALATRY : Physique

PROFESSEUR ASSOCIE :
M. DEFIX : Mécanique Appliquée

PROFESSEURS SANS CHAIRE :
MM. POTIER : Physique des Solides
DEVIN : Chimie Générale
Mle LEGRAND : Botanique
MM. REAL : Zoologie
VALLEE : Mathématiques Appliquées
GOUARNE : Mathématiques
CERUTTI : Chimie Appliquée
BONNEAU : Astronomie

MAITRES DE CONFERENCES :
MM. THEOBALD J.G. : Spectroscopie Hertzienne
PARIZET : Mathématiques
HARTMANN : Physique

CHARGES D'ENSEIGNEMENT :
MM. REMOND : Chronométrie
MASSONIE : Mathématiques

CONSEILLER ADMINISTRATIF UNIVERSITAIRE : M. LAMBERT

Mes remerciements iront d'abord à Monsieur Le Professeur DREYFUSS, Directeur du Centre de 3ème Cycle de Géologie Appliquée. Son enseignement et son expérience m'ont permis de mener à bien, le travail passionnant qu'a constitué cette étude.

Je remercie Messieurs les Professeurs THEOBALD et THIEBAUT, pour leur enseignement et d'avoir bien voulu accepter de faire partie de mon Jury.

Que les membres du laboratoire trouvent ici, l'expression de ma gratitude pour leur aide, en particulier Mesdemoiselles MOREAU et VALBERT et Messieurs CONTINI, MARTIN et MERCIER.

Que les Directions des Sociétés d'Etudes, BEARNAISE (Poitiers), L. MENARD (Paris), SOPENA (Chartres), et l'Agence SOCOTEC (Besançon), qui ont très ainablement mis à ma disposition, soit leur laboratoire de Mécanique des Sols, soit les documents d'Etude de leurs archives, soient associés à ces remerciements.

En terminant, je remercierai tout spécialement, Messieurs ROUSSEAU et MONEK, respectivement Directeur Technique et Ingénieur à la Société SOLETCO, qui par leurs conseils ont considérablement facilité ma tâche.

I N T R O D U C T I O N

----oOo----

Les sédiments argileux de la série jurassique de Franche Comté, ont été étudiés depuis des dizaines d'années, au même titre que les formations marneuses à l'Est du bassin parisien, avec lesquelles elles ne sont pas sans analogies.

Les formations sontparfaitement connues, cependant si on s'est attaché à les définir et à déterminer physiquement leur facies, dans la majorité des cas, c'est en perdant de vue les propriétés d'ensemble de ces sédiments.

On sait qu'un sédiment meuble est modifié continuellement par des processus diagénétique.

Le matériau évolue sous l'action de facteurs multiples parmi lesquels l'activité biochimique des organismes joue un rôle prépondérant. En profondeur, nous verrons que cette activité biologique fait progressivement place à une activité physio chimique. Ceci amène à penser que l'étude d'un sédiment ne permet en tout état de cause, de dégager des conclusions concernant ses caractéristiques que pour un moment donné de son évolution.

A l'échelle d'un sol de fondation, cette évolution peut être plus ou moins lente.

Il est par conséquent utile de choisir une méthode d'étude qui permette de connaître l'histoire du sédiment, ses propriétés actuelles et de prévoir l'évolution de celles-ci, quant à leur vitesse de transformation et à la nature de celle-ci, en fonction des surcharges susceptibles de lui être appliquées.

C'est en abordant cette étude avec un esprit de synthèse que l'on relève de nombreuses incidences entre la géologie et la mécanique des sols.

A cet égard, l'emploi de méthodes simples comme la mesure des caractéristiques physiques et plus particulièrement la détermination pour un matériau donné de ses limites d'Atterberg, semblent donner des résultats communs à la relations entre la géologie et la mécanique des sols : deux sciences qui se sont le plus souvent ignorées.

C'est ce que nous avons essayé de réaliser en étudiant les sédiments argileux de la série Jurassique, principalement dans les environs de Besançon. Ce travail ne sera, ni une étude géologique pure, ni une étude géotechnique approfondie. Dans le cadre d'une recherche de géologie appliquée elle servira d'approche aux méthodes tendant à compléter la connaissance d'un sédiment marneux en vue de son application aux problèmes de fondation.

Dans ce but nous avons divisé notre travail en trois parties :

I°) Dans un premier temps nous avons essayé de replacer les sédiments prélevés, dans leur contexte géologique.

2°) Puis à l'aide de paramètres simples nous avons fait entrer ces marnes dans des classifications plus ou moins empiriques en essayant de satisfaire des exigences relevant de la géologie aussi bien que de la géotechnique.

3°) Dans un dernier stade, profitant des résultats de ce travail, nous avons repris ceux-ci dans une optique purement géotechnique en vue de leur application à l'étude des fondations.

SITUATION GEOGRAPHIQUE

Les prélèvements d'échantillons à étudier ont été effectués dans leur majorité aux alentours de Besançon, dans une région concernant les feuilles au I/25.000 (I-2, 3-4, 5-6 7-8) de Besançon.

La région bisontine, située sur la bordure externe du Jura Franc-Comtois, est constituée dans sa partie la plus spectaculaire par le faisceau bisontin, zone plissée, limitée au Nord-Ouest, comme au Sud-Est, par des plateaux qu'on a assimilés depuis fort longtemps à des Surfaces d'Erosion. Ces plateaux sont les restes généralement peu déformés de ces surfaces d'aplanissement.

Les reliefs du faisceau bisontin, correspondent à des zones plissées portant la trace des différentes déformations les ayant affectés ; ils dépassent rarement 600 mètres.

La nature essentiellement calcaire des terrains jurassiques ainsi que l'âge récent des derniers plissements se sont répercutés sur l'hydrographie des cours d'eau du Jura. Seuls, les plus puissants comme le Doubs ont pu subsister en s'enfonçant au fur et à mesure que s'élevaient la surface de la région dans laquelle ils étaient préalablement inscrits.

Le Doubs est ainsi profondément encaissé vers 250 mètres. Inversement, les affluents n'ont pas pu toujours suivre ce rytme, leurs eaux insuffisantes, ont pénétré dans le calcaire fissuré et il en est résulté des vallées sèches.

PREMIERE PARTIE

E T U D E G E O L O G I Q U E

INTRODUCTION A LA GEOLOGIE DE LA REGION DE BESANCON

Le faisceau bisontin, témoin d'une tectonique violente peut se décrire sommairement comme le chevauchement d'un anticlinal assez régulier par un anticlinal dissymétrique. Autour de ce modèle tectonique constant, toutes sortes de variations viennent compliquer ce schéma : relais d'anticlinaux chevauchants ou chevauchés, présence spasmodique d'un synclinal entre deux anticlinaux, synclinal se reduisant parfois à une écaille.

- Le premier anticlinal bordant au Nord-Ouest la surface de Montrond et qui forme la suite anticlinale Pugey - Montfaucon - Forêt de Vaite, n'est nulle part entamé par le Doubs.

Les sommets qui le désignent, plus élevés que ceux de la rive septentrionale du Doubs, dessinent lorsqu'on les examine depuis le plateau, une longue crête régulière, rarement entaillée par quelques cols : tels ceux du Château de Vaite, du Trou au Loup, de Fontain, témoins de l'existence de rivières transversales, infiltrées dans la masse calcaire comme nous l'avons vu précédemment.

- En revanche, le deuxième anticlinal existant au Nord-Ouest du Doubs, est attaqué de façon très intense par le Doubs et traversé par de nombreuses et profondes cluses : Rivotte, Taragnoz, Avenay-Montferrand, celles-ci parcourues par le Doubs actuel, tandis que d'autres : La Grotte-Velotte et Malcombe-Roche d'Or ont été délaissées.

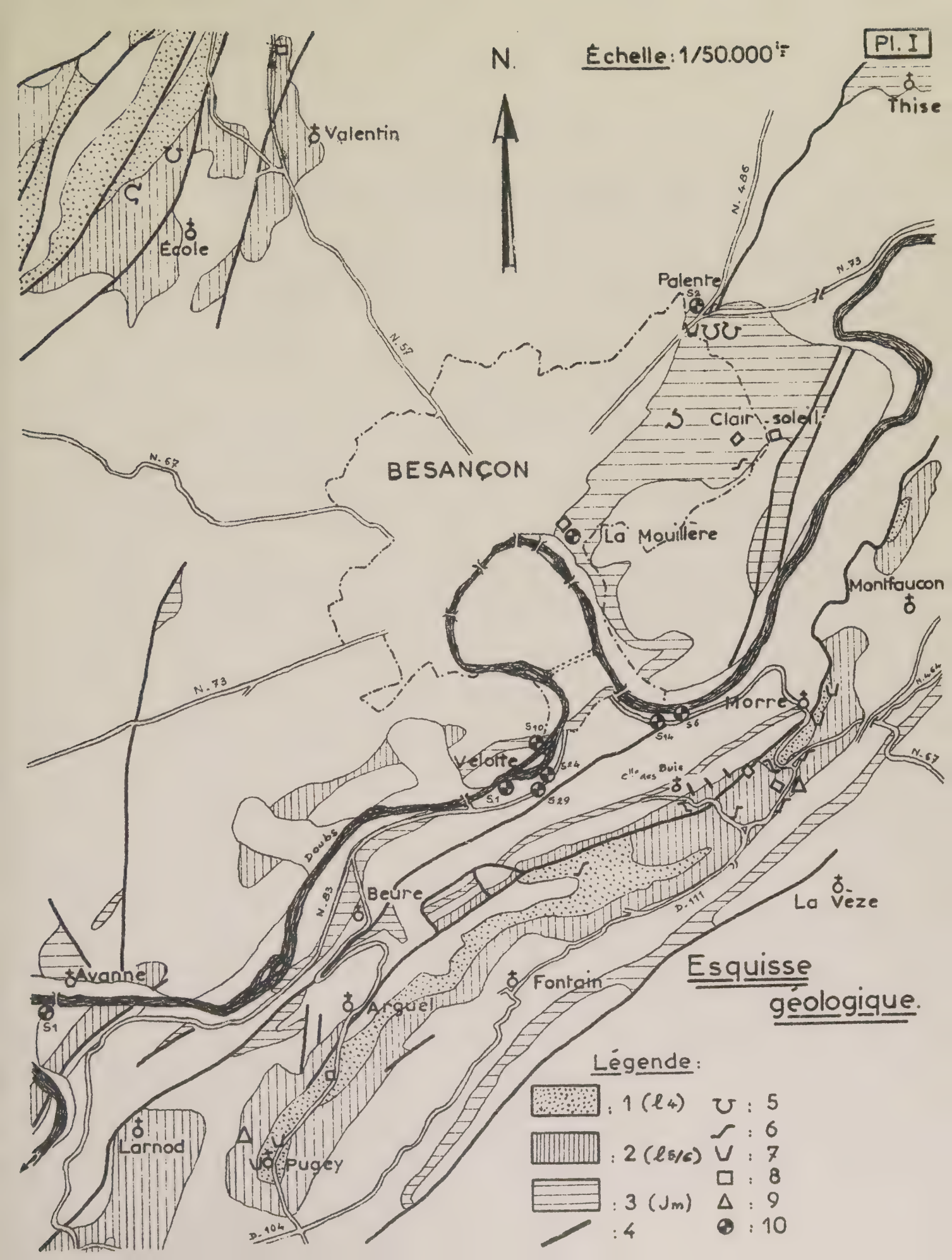
Du pli, ne restent plus que des collines témoins : Montferrand, Planoise, Rosemont, La Citadelle.

Figurés géologiques

1 : Charmouthien
2 : Lias supérieur
3 : Jurassique supérieur marneux
4 : Tracé des failles importantes

Points d'échantillonnage

5 : Carrières
6 : Talus
7 : Tranchées
8 : Fonds de fouilles
9 : Autres sites
10 : Sondages


Pl. I
N.
Échelle: 1/50.000ième
Thise
Valentin
École
N. 486
N. 73
Palente
S2
N. 57
Clair-soleil
BESANÇON
N. 67
La Mouillère
Montfaucon
N. 73
Morre
S6
S14
S10
Velotte
S24
S1
S29
Clle des Buis
N. 67
Doubs
N. 83
Beure
D. 111
La Veze
Avanne
S1
Arguel
Fontain
Esquisse géologique.
Légende:
: 1 (l4)
: 2 (l5/6)
: 3 (Jm)
: 4
U : 5
: 6
V : 7
□ : 8
△ : 9
◒ : 10
Larnod
Pugey
D. 104

ESQUISSE DE L'HISTOIRE MORPHOTECTONIQUE

Les deux lignes anticlinales que nous avons décrites précédemment, séparées par la Grande Faille du Doubs, témoignent d'une tectonique variée, que nous décrivons sommairement ci-après :

- A la fin du Vindobonien, un large mouvement de bascule affecta tout le Jura septentrional en l'abaissant.

- On assiste ensuite à la déformation d'un large couloir à ponte Nord-Est - Sud-Ouest.

- La fin du Pontien voit le rejeu vertical de l'anticlinal Pugey-Montfaucon suivi de son coffrage. Des chevauchements tels que celui de l'Ecaille du Bois de Peu prennent alors naissance.

- Peu après, au Pliocène inférieur, on note une légère surrection de l'anticlinal de la Citadelle qui se termine par l'abaissement de la gouttière synclinale Chalezeule-Beure.

- Le rejeu tectonique des plis est dès lors terminé. Seuls, à la fin du Pliocène et au début du Quaternaire, des mouvements d'ensemble se poursuivent : bombement transversal et mouvements relatifs des compartiments, le faisceau bisontin et le plateau de Montrond s'élevant par rapport à la surface de Grandfontaine.

S T R A T I G R A P H I E G E N E R A L E
DU JURASSIQUE AUX ENVIRONS DE BESANCON

Le sol de la région étudiée est constitué principalement par les terrains jurassiques reposant directement et semble-t-il, sans discordance sur le Trias.

Le nombre des affleurements de Trias étant très limité et comme en outre leur étude sort du cadre de cet ouvrage, nous ne le décrirons pas, bien que son importance soit très grande dans le Jura de par sa nature; sa présence justifierait, à elle seule, une étude de géologie appliquée.

En revanche, nous passerons en revue d'une manière assez détaillée, la totalité du Jurassique; il est en effet nécessaire d'étudier la suite des terrains calcaires et marneux dans une

région où la sédimentation s'est faite en alternant ces deux sortes de dépôts.

Malgré l'objet de notre étude, la connaissance des niveaux calcaires reste indispensable tant au géotechnicien qu'au géologue pour lesquels ils fournissent des repaires stratigraphiques indispensables.

I - LE LIAS

Introduction

Les couches du lias ont subi des compressions, des dislocations, des étirements au cours des phénomènes orogéniques qui ont donné à l'ensemble du Jura son relief actuel. Les poussées ont eu pour effet de réduire les épaisseurs par laminage ou de "barrer" les couches dans des poches.

Ce n'est qu'ainsi, que l'on peut expliquer les différences considérables que les auteurs assignent à la puissance des assises liasiques sur d'assez faibles distances, différences que nous avons pu constater en maints endroits.

A - Le Rhétien

Nous l'avons placé par 15 mètres environ par simplification dans l'Infralias; en fait la tendance actuelle le fait considérer quasi unanimement comme triasique. Le rhétien est constitué de deux ensembles :

- A la base, de minces bancs gréseux violets calcaréo-dolomitiques micacés alternent avec des schistes noirs en plaquettes, se débitant à l'affleurement en petits prismes.

Ces schistes marquent le passage entre le Trias classique et le Rhétien. Les grés sont remplis de débris de lamellibranches et caractérisés par la présence d' Avicula contorta.

- Puis un banc de calcaire gypsifère très analogue à ceux de Keuper.

- Au dessus se trouve le niveau des Marnes de "Levallois", argileuses, bariolées, allant du brun rougeâtre au brun chocolat, et à cassure conchoïdale. Elles sont stériles et renferment des

intercallations de schistes noirs se délitant finement.

Ces assises sont bien visibles en particulier dans un petit ruisseau du Moulin Caillet, au lieu dit "Entre deux Bois".

Le Lias Calcaire.

B - l'Hettangien

Avec l'Hettangien nous pénétrons dans le Lias proprement dit. Epais de 2 mètres environ, il comprend les couches situées entre les Marnes de Levallois et les calcaires à Gryphea arcuata.

Il est formé d'une faible épaisseur (1,80 mètres à Vorges) de calcaires gréseux dolomitiques, phosphatés, peu fossilifères (Psiloceras planorbis et Schlotheimia angulata au sommet).

Le passage des calcaires gréseux de l'Hettangien aux calcaires bleux et spathiques du Sinémurien se fait d'une façon insensible.

C - Le Sinémurien

Il est constitué par 7 mètres environ de calcaires à Gryphées arquées. C'est un calcaire gris bleu, cristallin à odeur sulfurée, se présentant sous forme de bancs d'épaisseur variable, séparés par de minces lits de marnes noires terreuses, au toit desquels se dégagent de véritables Lumachelles à Gryphées, accompagnées d'Ammonites Lamellibranches et Brachiopodes.

Dans la masse du calcaire, on trouve de la base vers les couches supérieures : Coroniceras rotiforme
Arietites bucklandi et bisulcatus
Arnioceras semicostatum

Spiriferina walcotti y abonde.

La combinaison de l'Hettangien et du Sinémurien, forme dans la morphologie un ressaut constant qui se repère aisément partout où il est dégagé. Cette "barre" généralement recouverte de taillis, forme dans la nature des bandes étroites couvertes de haies vives qui coupent les pentes herbeuses monotones de la combe liasique.

D - Le Lotharingien

Ce sont à la base des marnes grises, feuilletées à modules calcaires, pourvues en fossiles; on peut y trouver, Astéroceras obtusum, Oxynoticeras oxynotum et Promicroceras planicosta.

Au dessus, il est représenté par une dizaine de mètres de calcaires ocreux marneux, à Echioceras raricostatum et Gryphea obliqua, présentant une altération rouille.

Dans la topographie, ils font suite sur une dizaine de mètres à la "barre" sinémurienne. L' nsembl du Lias calcaire peut atteindre une épaisseur de 15 mètres.

Le Lias Marneux.

E - Le Charmouthien

La limite Lotharingien - Pliensbachien a été définie comme se trouvant entre la zone à Echioceras raricostatum et Uptonia jamesoni.

Dans la région bisontine, il se développe sur plus de quarante mètres et donne dans la topographie, des talus irréguliers occupés par des prés.

Le terme charmouthien englobe deux étages : le Pliensbachien et le Domérien.

a) Pliensbachien -

à la base, se trouve des alternances de bancs calcareo-marneux noyés dans une marn gris bleuté à nombreuses Bélemnites et Plicatules : Zeilleria numismalis.

Au dessus apparaissent des bancs de calcaire gris clair à bélemnites, en pavés irréguli rs à cassur conchoïdal . Ces calcaires marneux, comptacts, primitivement bleus, deviennent jaunâtres après exposition à l'air.

Ils se présentent sous forme de bancs de 10 à 20 cm d'épaisseur séparés par de minces lits de marnes bleues ou brun-jaunâtres, lorsqu'elles sont coloriées par l'oxyde de fer. L'ensemble fait environ une dizaine de mètres.

b) Le Domérien -

1°) Domérien inférieur

Avec l'apparition des premières Amaltheus margaritatus nous penétrons dans le Domérien inférieur.

Celui-ci est formé de puissantes couches marneuses gris-jaunâtres, grasses, devenant de plus en plus grises et compactes avec la profondeur; elles sont légèrement sableuses et micacées. Les paillettes de Muscovite étant un caractère spécifique de ce niveau nous pouvons le plus souvent nous repérer, malgré l'absence de fossiles. De nombreux rognons calcaires, ovoïdes, ellipsoïdes (les miches) parsèment ces couches, voisinant avec des modules pyriteux.

Assez calcaires, plus ou moins plastiques, parfois d'une seule masse indivise, les marnes se présentent dans d'autres cas, sous forme de feuillets minces de même nature. Elles se développent sur une vingtaine de mètres.

2°) Domérien supérieur

Faisant suite à ces couches, se développent sur environ quarante mètres, des alternances de marnes gréseuses micacées et de bancs calcaires gréseux dans lesquels on trouve parfois abondamment Amaltheus spinatus.

Les couches sont uniquement marneuses à la base, plus ou moins micacées parfois gréseuses. Les bancs marno-calcaires, souvent sableux avec des veines spathiques, deviennent de plus en plus nombreux puis constants vers le sommet de l'étage. Ces barres de 10 à 15 cm d'épaisseur, en but à la désagrégation forment des allignements de pavés dans les coupes. Au milieu des calcaires on peut noter des concrétions de Blende, de Barytine et Calcite

L'assise se présente dans certains cas, sous forme de marnes renfermant de gros modules de calcaires cloisonnés. Vers le sommet, les bancs calcaires sont plus constants, les marnes plus gréseuses. En première analyse, les distinctions entre les différents facies semblent simples. Il n'en est rien : les couches à Plicatules du Domérien supérieur ne se distinguent pas tellement des couches à Amaltheus margaritatus du Domérien inférieur, toutes deux représentées par des marnes gris bleutées, plus sableuses à la partie supérieure.

L'absence de fossiles dans la plupart des coupes étudiées, le fait que ces matériaux sont susceptibles de glissements de grande amplitude, n'ont fait que compliquer le relevé de la stratigraphie de ce sous-étage, dont l'épaisseur totale peut atteindre les 50 mètres.

F - Le Toarcien

a) Toarcien inférieur -

La limite Charmoutien supérieur - Toarcien est très individualisée : des couches à Amaltheus spinatus, on passe sans transition aux schistes cartons.

Ce sont des schistes argileux feuilletés et bitumineux, bleutés à Posidonomyes et à Hildoceras bifrons, Harpoceras falciferum, Hildoceras serpentinum.

A leur base, très constants, se placent deux bancs de calcaires gréseux et bitumineux à Bélemnites encroutées et écailles de poisson.

Après une dizaine de mètres de ces "schistes bitumineux" on entre dans les couches à Dactylioceras commune représentées par des marnes noyant des concrétions calcaires ou miches de pain.

b) Toarcien supérieur -

Il débute par des marnes bleues ou grises, pouvant être très altérées en surface et devenir franchement rouille par endroits. L'altération superficielle donne le plus souvent des marnes panachées, mais leur couleur naturelle tire sur le gris-noir.

Ces marnes très argileuses sont grasses, le plus souvent plastiques à nombreuses Ammonites pyriteuses, Trochus subduplicatus, Thecocyathus. Les Posidonomyes peuvent également exister à ces niveaux.

Des rognons de Pyrite; des miches calcaréo-marneuses ellipsoïdales, sont parfois rencontrées vers la base, dans la masse marneuse.

Le Toarcien sensu stricto se termine par les marnes sableuses plus ou moins ferrugineuses et à Hildoceras insigne.

L'ensemble de cette étage atteint une puissance de 50 à 70 mètres, mais est très affecté par des glissements en masse.

G - L'Aalénien

a) Aalénien marneux -

Très souvent recouvert par des éboulis de pente provenant de la Corniche médio-jurassique qui rendent sa cartographie problématique, il fait suite sans discontinuité aux marnes du Toarcien.

Ce sont surtout des marnes gris-sombres, schisteuses, renfermant des modules cylindriques de Limonite et de minces bancs calcareo-gréseux et micacés, sur la surface desquels nous avons reconnu des traces de Gyrochordes.

Parfois, ces marnes sont jaunâtres, graveuses (Nouvelle Marnière d'Ecole). La faune est rare : Dumorteria levesquee, puis Pleydellia aalensis et enfin, Liocoras opalinum se succèdent de bas en haut. Les [illegible] y sont encore fréquents.

Dans cette dernière zone, peuvent s'intercaller des grès marneux rubannés.

L'assise moyenne à Pleydellia aalensis est représentée par des marnes conchoïdales bleues, compactes, se débitant en grès prismes; les fossiles y sont écrasés. Les alternances plus fréquentes de marnes - calcaires annoncent les dépôts marno- oolithiques qui formeront les premières assises de l'Aalénien calcaire.

Le Toarcien et l'Aalénien marneux se succèdent sans interruption; l'absence de roches dures a rendu la topographie confuse et le replat habituellement dessiné par les schistes cartons a été le plus souvent "emballé" par les glissements successifs.

L'ensemble liasique marneux a subi des variations considérables d'épaisseur pouvant être dues à des réductions tectoniques. Un sondage à la Marnière d'Ecole a donné pour le Lias marneux, une épaisseur totale de 120 mètres en partant sensiblement de la limite Toarcien - Aalénien, alors que plus à l'Ouest à Lantenne-Vertière la puissance des couches est beaucoup plus importante.

b) Aalénien calcaire -

Epais d'une vingtaine de mètres, et parfois surmontant les grès à Cancellophycus de la zone à Lioceras opalinum, il débute par des niveaux à Oolithes ferrugineuses brun-rouges très bien litées.

Au dessus, les couches à Ludwigia concava sont représentées par une prédominance de calcaires à Entroques bruns massifs, plus ou moins marneux alternant avec des calcaires à Oolithes ferrugineuses et renfermant de nombreuses chailles siliceuses et des bancs marneux.

Un banc de calcaire marneux à Pecten pumilus, gris roux très peu épais, marque le passage avec le Dogger.

On a pu constater que l'Aalénien n'est pas bien individualisé au point de vue pétrographie dans les environs de Besançon. Les zones inférieures (à Dumortieria levesquee, Pleydellia aalensis et Lioceras opalinum) prolongent le faciès marneux du Toarcien tandis que les zones supérieures (à Ludwigia ninchisenae et Ludwigia concava) réalisent déjà la sédimentation calcaire du Bajocien.

La coupure pétrographique entre Lias et Jurassique moyen, se produit donc de ce fait, au cours de l'Aalénien.

oO O Oo

II - LE JURASSIQUE MOYEN

L'Aalénien supérieur correspondait à l'apparition des faciès calcaires, ceux-ci vont se développer pendant tout le Jurassique, ainsi nous n'insisterons pas outre mesure sur ces étages.

Les calcaires du Jurassique moyen constituent un escarpement rocheux dominant la Combe liasique; le Jurassique moyen est communément divisé en deux étages.

A - Le Bajocien

a) Bajocien inférieur -

Le banc à Pecten pumilus, quand il existe, marque le passage : Aalénien - Bajocien.

Au dessus, correspondant à la zone à Emilia sauzei et Sonninia sowerbyi, se trouvent 10 mètres de calcaires à Entroques, massifs, à stratification souvent entrecroisée.

Puis, des calcaires à chailles, constitués par des bancs bien lités et facilement reperables, dominés par une masse importante de calcaires spathiques et à Entroques, interrompus par des intercallations marneuses.

27m. de

Il se termine par bancs à polypiers plus ou moins marneux, grumeleux, gris noirs, passant à un calcaire saccharoïde blanc. Des calcaires à Entroques y sont parfois intercalés . Le tout présente une épaisseur de 50 mètres environ

b) Bajocien supérieur - ou Grande Oolithe

D'une puissance de 65 mètres, il est constitué :

A la base, par un calcaire bicolore faisant suite au niveau à Parkinsonia parkinsoni; c'est le niveau de la Grande Oolithe. Le passage avec le Bajocien inférieur se fait parfois par l'intermédiaire de marne à Ostrea accuminata. Les premiers bancs montrent parfois des polypiers et une stratification entrecroisée qui tend à disparaître au fur et à mesure que l'on monte dans la série. Les couches oolithiques, qui vers le bas peuvent alterner avec des bancs de calcaires à Entroques, se normalisent vers le haut, les Oolithes étant de plus en plus calibrées.

Les débris d'Entroques persistant dans la masse coïncident avec la disparition de la couleur brune des Oolithes . A ce niveau, un banc à "nomies" et nérinées est connu à BESANCON. Vers le sommet de la série se trouve un banc de calcaire marneux assez constant.

B - Le Bathonien

Au dessus de la Grande Oolithe, le Bathonien est constitué par 80 mètres d'un calcaire compact lithographique, beige et très dur avec quelquefois des taches roses dans la masse; à la base s'intercalent des niveaux graveleux à pseudo oolithes et à texture finement grenue, de couleur jaune claire à "points" rouges ainsi que des niveaux à Momies et un banc à Rhynchonella decorata.

A l'affleurement, il se présente soit en falaises découpées par l'érosion, soit en surfaces tourmentées, résultant de la formation de Karsts. Vers la base et le sommet le Bathonien présente des bancs à Momies, caractéristiques.

Dans la région de BESANCON, le Bathonien est coiffé par une formation marneuse de 2 mètres d'épaisseur. Très discontinue, de caractère lenticulaire, elle est bien représentée à certains endroits et manque totalement dans d'autres. D'une façon générale, cette assise dont le type a été pris à Champforgeron, est constituée par une marne sableuse grise passant au bleu ou au jaune, primitivement feuilletée, elle se désagrège facilement à l'air en prenant un aspect terreux.

oO O Oo

III - LE JURASSIQUE SUPERIEUR

A - Le Callovien

Il repose sur la surface tarraudée du Bathonien supérieur marquant une tendance à l'inversion ou sur les marnes de Champforgeron.

De lithologie et d'épaisseur très variable, il se divise généralement en deux zones :

- Une zone calcaire à Macrocephalites macrocephalus de 1 mètre environ.
- Une zone marneuse à Reineckeia anceps.

A la base, la zone à Macrocephalites macrocephalus est représentée par le facies de la Dalle Nacrée : c'est un calcaire graveleux, oolithique, parfois riche en débris de Lamellibranches et à Entroques, gris bleu, à stratification entrecroisée.

Il est très rarement complet : En effet, la sédimentation, très peu profonde, à dû être entrecroisée par les courants de marées et l'agitation permanente de l'eau.

Au dessus, le facies de type marneux domine : se présentant souvent sous forme de poches dans la Dalle Nacrée, ce sont des marnes bariolées grises et jaunes à oolithes noires écrasées, avec des intercalations calcaires grises.

Elles sont surmontées de marnes sableuses micacées grises, à oolithes noires; ces couches prennent parfois une teinte brune et alternent avec des lits calcaires marneux gris, noduleux, irréguliers, pétris d'une faune riche avec Erymnoceras coronatum et Hecticoceras entre autres. Les bancs marnocalcaires deviennent de plus en plus fréquents vers le sommet.

Ces dépôts marneux sont discontinus, parfois ils disparaissent complètement. Ils sont par contre très bien représentés dans la tranchée de la R.N. 73 à Petit Palente.

B - L'Oxfordien

Nous insisterons sur cet étage, qui forme un ensemble marneux de 45 mètres environ, particulièrement développé. L'Oxfordien dessine généralement des dépressions marneuses et occupe les parties basses dans la topographie. Très fossilifé, cet étage, d'une grande homogénéité lithologique, est représenté nettement par des marnes qui deviennent généralement de plus en plus compactes lorsque l'on monte vers le sommet.

L'Oxfordien débute en principe avec la disparition des oolithes ferrugineuses, ce qui coïncide à peu près avec l'apparition de Quentedticeras lamberti. La partie inférieure est constituée par des marnes gris bleues qui donnent au paysage, par suite de glissements superficiels, une allure ravinée et irrégulière.

Par suite de l'action des agents météoriques, ces marnes se transforment sur place en une argile terreuse grisâtre, libérant quantité de fossiles pyriteux.

L'Oxfordien se divise en trois zones paléontologiques :

- La zone à Quentedticeras lamberti d'environ 10 mètres à la base.

- La zone à Quentedticeras mariae pouvant atteindre 45 mètres.

- La zone à Cardioceras cordatum à une vingtaine de mètres au sommet.

Ces trois zones ne correspondent à aucune limite lithologique nette.

Les marnes compactes, très dures, se développent en bancs épais sur toute la hauteur des coupes. A l'air elles se divisent promptement en bancs minces, puis en lames, ce délitage spontané étant facilité par la présence de nombreux nodules, pyrite, moules d'ammonites. Elles renferment assez souvent des lamelles de gypse prenant parfois l'aspect de cristaux trapèziens parfaitement formés ainsi que des petites concrétions sphéroïdales de Spath calcaire, tapissées de cristaux de calcite.

Vers le sommet de l'étage, les bancs marneux se durcissent, se rapprochant de plus en plus, en arrivent à former une masse indivise, sans trace apparente de stratification. Tout à fait au sommet, on observe une suite de bancs marno-calcaires plus ou moins siliceux contenant des chailles. Ces bancs, d'épaisseur variable se décomposent aux affleurements en sphérite, en rognons à contours arrondis : le fond des couches prend ainsi l'aspect de rangs de miches.

C - Lusitanien

I°) Argovien

Les bancs marneux de l'Oxfordien passent insensiblement à ceux de l'Argovien. L'Argovien, 40 mètres, débute au sommet des marnes gris-bleues et coincide à la disparition des fossiles pyriteux, en même temps les marnes prennent pendant 5 mètres, un faciès sableux bicolore le plus souvent gris-jaunâtre; on note la présence de chailles et de "miches", de plus en plus fréquentes, au fur et à mesure que l'on avance dans la série.

Nous avons ensuite sur 25 mètres une série d'alternances calcaire - marne pendant une dizaine de mètres. Les calcaires y sont

plus ou moins noduleux. Cette alternance, est de moins en moins de règle au fur et à mesure que l'on monte dans la série, les marnes ayant tendance à faire place au faciès calcaire.

Ces derniers sont marneux, plus ou moins feuilletés, gris marbrés de jaune souvent tendres et à nombreux fossiles silicifiés. Quand ils sont franchement calciares, ils présentent une pâte grumeleuse grise, à taches jaunes.

A 5 mètres du sommet, nous arrivons à des calcaires oolithiques et graveleux organigènes à débris de fossiles : sections de tiges d'oursins, rondes : les Apiocrinus; ceux ci, très nombreux, sont totalement ou partiellement silicifiés. L'importance de la silification diminue vers le sommet. Sa disparition annonce le Rauracien.

Nous avons donc, sans discontinuité avec le Callovien marneux, l'Oxfordien et l'Argovien marneux, une série marneuse très importante d'une centaine de mètres.

2°) Rauracien

Nous passerons rapidement sur cet étage, uniquement calcaire, dont le début coïncide avec la disparition des points silicifiés.

Epais de 40 mètres, le Rauracien est composé principalement de formations récifales à polypiers et passant latéralement à des calcaires oolithiques pisolithiques et pseudo-oolithiques, ou à des calcaires grumeleux et légèrement marneux, parfois en plaquettes. Ils sont caractérisés par de nombreux débris organiques de teinte blanche : de fréquents bancs à nonies. Les deux tiers supérieurs de cet étage sont franchement oolithiques.

Au sommet on note :

. Des calcaires compacts à pâte fine.

Le Rauracien constitué de bancs épais très durs, forme une corniche constante dans la nature, au dessus de la Combe Oxfordienne.

D - Le Séquanien

Là encore il s'agit d'un étage essentiellement calcaire, très épais. Cependant tout le Séquanien moyen correspond à une zone marneuse.

Le passage Rauracien - Séquanien se fait dans les calcaires compacts sans fossiles, par l'intermédiaire d'un micropoudingue oolithique. Celui-ci serait le témoin d'une lacune dans la sédimentation.

a) Séquanien Inférieur -

Il se compose de 35 mètres de calcaires à Astartes.

Il débute par un calcaire fin, compact : sublithographique, quelquefois grumeleux, beige, avec des vacuoles de calcite cristallisée, quelques gravelles orangées dans la partie inférieure.

Ces calcaires compacts, qui se développent sur 25 mètres, deviennent oolithiques et graveleux dans la partie supérieure.

Ils sont surmontés par 10 mètres de calcaires finement graveleux.

Ces faciès sont visibles dans la coupe de la route de Pontarlier à la sortie de BESANCON, (après la Porte Taillée). Plus à l'Ouest, vers Boussières, le faciès oolithiques apparaît :

Une coupe prise sur la D.104 à la sortie de Moulin-Caillet montre, à partir de la base, des calcaires sublithographiques, beiges à Solénopores;

- surmontés de calcaires à Pseudocyclamina jaccardi en bancs de 30 à 40 cms.

- des calcaires oolithiques blancs, se délitant plus ou moins en plaquettes, les oolithes se présentant en relief.

- une zone crayeuse à points roses, riche en microfaune.

- un banc à grosses nomies à la partie supérieure.

Au sommet, des bancs à galets et à characés, rarement visibles marquent une nouvelle tendance à l'émersion.

Aux environs de BESANCON, le Séquanien inférieur se termine par un banc "prismatique".

b) Séquanien moyen -

Epais de 40 à 50 mètres il débute :

- par une zone brèchique à petits cailloux, oxydés, celle-ci n'étant pas toujours visible.

- Au dessus, sur une dizaine de mètres, se développent des calcaires marneux gris, roux ou bicolores à Gravelles et petites Nérinées.

- puis 4 à 5 mètres de marnes gris-bleues.

- une vingtaine de mètres de calcaires marneux en bancs de 50 cms, alternant avec des passages franchement marneux. Ces calcaires marneux ne sont pas constants et font place à des calcaires bico ores, des calcaires gréseux à Pseudocyclamines, des calcaires graveleux à Trocholines et Textulaires.

- enfin au sommet, les marnes alternent avec des calcaires sublithographiques sur 10 mètres environ.

- la série se termine par une nouvelle brèche à éléments plus grossiers, rarement visible.

La Combe Séquanienne forme un replat structural dans le paysage.

c) Séquanien supérieur -

Très épais, plus de 80 mètres, il présente une succession monotone de calcaires microgravelaux ou sublithographiques. Ceux-ci alternent avec des calcaires plus ou moins marneux sur une dizaine de mètres vers la base, ensuite on à

une série puissante de calcaires sublithographiques à Terébratules.

L'étage se termine par des calcaires micrograveleux à oolithes et entroques et où apparaissent des traces ferrugineuses.

E - Le Kimméridgien

Comme le Séquanien, le Kimméridgien présente des niveaux marneux importants.

1°) Le Ptérocérien

Le passage du Séquanien au Kimméridgien se fait par deux niveaux de calcaire marneux glauconnieux de 1m50, très fossilifères.

Au dessus se développent sur une quarantaine de mètres, des calcaires compacts sublithographiques à tendance crayeuse et le devenant de plus en plus vers le haut.

Ensuite on remarque des calcaires à passages organigènes Lumachelles à Brachiopodes, gastéropodes, huîtres; le tout fait environ 100 mètres. La série passe à des marnes franches vers le sommet.

2°) Le Virgulien

Sur 40 mètres, c'est une suite d'alternances de calcaires blancs-jaunâtres, tendres à tendance crayeuse, souvent en lits minces et des marnes gris-bleues ou blanchâtres, sèches, sableuses, très facilement désagrégeables.

Dans tous les niveaux Exogyra virgula abonde au milieu d'une faune abondante.

Le Virgulien n'a été vu nulle part à l'affleurement; dans la région de BESANCON, par contre, les sondages faits en vue de l'étude du Tunnel de la Citadelle l'on traversé en plusieurs endroits et ont permis de noter la succession stratigraphique.

F - Le Portlandien

Dans la région de BESANCON, il couronne les reliefs au dessus du Doubs. Il y est formé de 20 mètres de calcaires compacts

sublithographiques, gris-beiges à traînées brunes avec de minces bancs dolomitiques sous la forme de calcaires en plaquettes ou rubannés à tubulures, pouvant renfermer des niveaux de cargneules et annonçant l'émersion finale du Jurassique.

Cet étage ne nous intéresse que médiocrement, étant donné l'absence de niveaux marneux.

oO ^{O} Oo

Il ressort de l'étude du profil général des terrains aux environs de BESANCON, que notre travail sur les séries marneuses, intéressantes soit par leur puissance, soit par leur répétition portera, essentiellement sur :

1°) Le Lias marneux : Charmouthien, Toarcien et Aalénien inférieur.

2°) L'ensemble Callovien supérieur - Oxfordien - Argovien inférieur.

3°) Les Marnes de la Combe Séquanienne et du Virgulien.

oO ^{O} Oo

D O N N E E S G E O L O G I Q U E S D E S
M A R N E S E T U D I E E S

I - ESSAI DE RATIONALISATION DANS LA DENOMINATION DES MATERIAUX ARGILEUX.

Tant dans la description de la série stratigraphique, que dans celle des sites géologiques, nous avons utilisé le terme de Marnes; ceci dans le parti pris de ne pas bouleverser les données acquises par des recherches stratigraphiques des auteurs, de simplifier aussi, étant entendu que le terme de marne est compris jusqu'alors comme l'expression d'un sédiment argileux d'origine marine.

Or, dans un ouvrage récent (M. MILLOT 1964) a été proposéeune nomenclature rationelle, que nous avons reprise dans notre étude, en y apportant de très légères modifications, justifiées par l'orientation géotechnique que prend à un certain moment notre étude.

Tout au long du travail qui va suivre, nous donnerons à nos sédiments, leurs termes propres : termes que nous avons définis dans le paragraphe suivant.

NOMENCLATURE UTILISEE

1°) Argilite

C'est la roche formée en majeure partie de minéraux argileux, sans litage notable. N'ayant que peu ou pas de Carbonate de Calcium, elle ne fait pas effervescence à l acide.

2°) Shale

C'est le terme anglais introduit dansle langage géologique français. Il désigne une argilite litée. Le litage étant dû, ici, à la sédimentation.

3°) Schiste

Ce terme implique une action mécanique. Le délit schisteux étant indépendant de la stratification : il est évident, qu'à travers cette définition les noms de schistes cartons ou de schistes noirs

rhétiens sont absolument impropres. Nous continuerons cependant à les employer, par souci de ne pas bouleverser une détermination entendue de tous, dans ces cas bien précis.

4°) Marne

C'est une argilite calcaire. Prenant pour principe qu'une roche argileuse est une marne dès l'instant où l'on constate une effervescence avec l'acide chlorhydrique, nous avons fixé à 5% de carbonate de calcium, la limite inférieure de teneur en Co_3 Ca des marnes.

5°) Argilite ou Marne Silteuse

Nous emploirons le terme de silt (anglais), de préférence à limon, pour désigner la fraction granulométrique le terme limon, impliquant surtout l'origine éolienne du sédiment.

On verra plus loin que la courbe granulométrique des sédiments marins du Jurassique se développe dans la fraction silteuse, alors qu'elle intéresse fort peu la fraction sableuse.

o
o o

II - DESCRIPTION MACROSCOPIQUE DES ECHANTILLONS ETUDIES DANS LE CADRE DE LEUR GISEMENT.

LA COMBE LITHOLOGIQUE DES [illegible]CULAUX

SITUATION GEOGRAPHIQUE

Cette combe s'étend au Sud de BESANÇON, parallèlement au Doubs qu'elle suit du Sud-Ouest au Nord-Est.

Elle prend naissance aux environs de Pugey; au Sud, Arguel au Nord et Fontain au Sud, va couper au Nord la R.N.67 à la hauteur de Morre puis s'étendre au Nord-Est vers Montferrand.

C'est une dépression allongée et étroite, couverte de prairies, dominée par les reliefs des Monts des Buis au Nord et par ceux du Bois dela Chelotte et du Bois de la Côte au Sud.

DESCRIPTION GEOLOGIQUE

Le Lias étudié, fait partiedu noyau brachyanticlinal d'un grand pli qui s'étend de Pugey à Montfaucon en passant par les Mercureaux. Le noyau liasique de ce pli est cerné par les calcaires à Entroques du Bajocien inférieur. Au Nord-Est de Morre les calcaires bajociens dessinent la voûte du pli anticlinal et le Lias ne réapparaît que dans les environs du Chateau de Montfaucon.

L'axe anticlinal est affecté de légères ondulations : il culmine à Maillot (à l'Est de Bourre) où affleurent les marnes irisées du Keuper et s'abaisse régulièrement vers le Nord-Ouest jusqu'au Petit Trouchot.

L'altitude des différents affleurements de Schistes à Posidonomyes montre qu'ensuite, l'axe se relève légèrement au du Grand Trouchot, pour s'abaisser à nouveau Sud de Morre dans le grand virage de la route de Pontarlier.

Le Lias qui forme avec le Trias le noyau du brachyanticlinal est en contact vers le Nord-Ouest avec les éléments très divers du flanc renversé, en certains points le contact se fait brutalement par l'intermédiaire de la faille chevauchante de la Chapelle des Buis.

La Combe est intéressée par toute la série liasique marneuse et nous a donné de nombreux affleurements en bon état.

a) Pugey

Une tranchée d'assainissement percée au cours de l'été 1964, au coeur du village, nous a donné des Bélemnites (21 - 22 - 23 - 26 - 27 - 28), ce sont des Marnes à "michas" où ont été trouvées de nombreuses Bélemnites. Le plus souvent ces marnes ont des teintes brunes dues à l'alteration superficielle et sont caractérisées par une décalcification prononcée.

Ce sont des Marnes des couches à Amaltheus margaritatus.

b) Arguel

Un peu plus loin vers l'Est, une fouille de fondation un peu avant Arguel au bord de la R.D. 111, nous a donné une Argilite

bariolée, fortement altérée à nodules calcaires et limoneux enveloppant de nombreuses Bélemnites, et sensiblement du même niveau qu'à Pugey (29).

Entre Pugey et Arguel, à un lieu-dit les Grands Prés, à environ 500 mètres au Nord de l'église de Pugey vers l'altitude 420, une ancienne marnière, en très mauvais état, ne nous a pas permis de prélever plus d'un échantillon (20).

C'est une Argilite gris-noire, altérée avec des couches à Lytoceras jurense du Toarcien supérieur.

Ce gisement a fourni de nombreux fossiles, notamment des Térébratules, des Posidonomyes et de nombreuses ammonites : des Coeloceras, des Haugia. Pseudogrammoceras saemanni DUMORTIER,
Grammoceras fallaciosum cotteswaldiae BUCKMAN,
Pseudogrammoceras quadratum QUENSTEDT.

Au coeur de la Combe, le ruisseau des Mercureaux a entaillé des couches de marnes compactes.

Là encore, les affleurements sont en mauvais état, et nous n'avons pu prélever qu'un échantillon du Charmouthien (5), un shale marneux gris, compact, très certainement du Domérien inférieur.

c) Le Grand Treuchot

Le Grand Treuchot, qui est une colline couronnée par les calcaires de l'Aalénien, nous a fourni une coupe fragmentaire allant du Charmouthien supérieur à l'Aalénien.

La coupe débute au large virage décrit par la route de Pontarlier (N.P. 67), à la sortie de Morre avant de repartir vers le Nord-Est et le Trou au Loup. A l'entrée du virage, dans un chemin montant vers la Chapelle des Buis, un échantillon, le 57, a été extrait : c'est un Shale marneux brun-grisâtre.

Puis les échantillons 50 et 56 ont été prélevés à la sortie du virage; ce sont des marnes silteuses gris-brunâtres, ennoyant de minces bancs calcaires continus, du Domérien supérieur, ayant un pendage 5 - 10 °/310 N.W. Immédiatement en dessous nous avons les chistes cartons (échantillons 52 à 55), qu'on retrouve

un peu plus haut dans la tranchée à flanc de coteau de la N. 67 (échantillon 5I), à la sortie du virage décrit plus haut.

Des marnes grises (48 et 49) des niveaux supérieurs des couches à Harpoceras falciferum ont été prélevées sous un mince banc de calcaire. Cet affleurement a donné une faune abondante.

Dans les schistes à Posidonomyes, on a relevé :

Posidonomya voltzii GOLD
Hildoceras bifrons BRUG
Lioceras serpentinum SCHLOTH
Coeloceras annulatum SOW
Coeloceras crassum PHILLIPS

Au dessus, les marnes à Trochus ont apporté entre autres :

Turbo subduplicatus d'ORB
Turbo capitaneus MUNST
Leda rostralis LAM
Lioceras complanatum BRUG
Coeloceras commune SOW

Les marnes du Toarcien supérieur se retrouvent au Sud, au bord de la D. 111, qui partant du grand virage de la route de Pontarlier se dirige vers la Chapelle des Buis. (Cette route a été élargie au début de l'année 1964, ce qui a apporté des affleurements très exploitables).

Dans la première partie de la route, au pied du Bois de la Côte et juste avant le virage du Grand Trouchot, les marnes ont probablement été l'objet de glissements et faute d'arguments paléontologiques nous n'avons pas pu les dater précisément.

L'échantillon 47 issu d'une fondation est une marne bleue à altération jaunâtre, enveloppant des plaquettes indurées avec des nodules calcaires. L'échantillon 4, décalcifié, jaunâtre issu d'un glissement est très probablement représentatif du Toarcien supérieur .

Les prélèvements suivants (30 , 30, 3I, 32, 33) sont très probablement des marnes aaléniennes ayant glissé. Ce sont des marnes grisâtres alternant avec des argilites rouilles, ces

dernières ayant subi en outre un remaniement d'ordre phisico-chimique.

Au-dessus, dans le virage du Grand Trouchot, nous sommes dans l'Aalénien qui nous a fourni 5 échantillons (34, 35, 6/36, 37, 38), qui sont des schistes marneux gris-bleus silteux et micacés.

Ces couches ont fourni de nombreux fossiles :

Trochus subduplicatus, Leda rostralis, Pleydellia aalensis, Pleydellia costula.

L'éch. 38, a été prélevé dans le voisinage de la Grande Faille de la Chapelle des Buis dans des couches ayant probablement été intéressées par le contre-coup tectonique consécutif à la formation de la faille de la Chapelle des Buis.

Cette faille subverticale met en contact l'Aalénien marneux supérieur, dont les couches, sensiblement horizontales à cet endroit, constituent le coeur de l'anticlinal des Mercureaux, au contact des couches redressées du Lias inférieur, très réduites.

En reprenant la succession stratigraphique au-delà de la faille, après les calcaires à gryphées du Sinémurien, on découvre les couches verticales du Domérien qui s'amortissent quelque peu au droit de la Chapelle des Buis avec un pendage de 75° S.E. I35.

Ces couches nous ont donné 6 échantillons (39, 40, 4I, 42, 43, 44), et fourni une faune abondante, avec :

Amaltheus gibbosus SCHLOTHEIM
Rhynchonella variabilis SCHLOTHEIM
Amaltheus bechteri FRENTZEN
Cymbites globosus ZIETEN
Oistoceras amissum SIMPSON

Les marnes à "miches" plus ou moins grèseuses du Domérien inférieur et moyen, ont également dû subir des réarrangements structuraux et des ajustements minéralogiques consécutifs aux réductions d'épaisseurs contemporaines de la formation de la faille de la Chapelle des Buis.

d) Morre

Au village de Morre, la faille de la Chapelle des Buis devient légèrement chevauchante et met en contact les couches de l'anticlinal liasique avec le Jurassique supérieur. Une tranchée consécutive à des travaux de voirie a traversé toutes les couches du Lias.

Parallèlement à la N.P. 67, cette tranchée traverse le village d'Ouest en Est. Nous y avons prélevé les échantillons (6I, 59, 60, 58, 76 et 77), appartenant au Domérien inférieur.

Ce sont des marnes brunâtres. Les échantillons 59 et 61, qui sont pour le premier : une argilite verdâtre et pour le deuxième : une argilite bariolée, présentent des propriétés corrosives.

L'échantillon 76, une marne gris-bleutée à taches jaunâtres, a posé un problème d'ordre stratigraphique.

Prélevé à l'Est de Morre, au bas de la pente descendant du bois de la Vaîte, il semble bien que nous ayons là, affaire à une loupe d'arrachement. D'autres "paquets", englobant cette fois-ci, des schistes cartons, ont d'ailleurs été signalés un peu plus haut, sur cette même pente.

Aucun fossile ne nous a permis de dater ce matériau. Une analyse micropaléontologique a révélé des organismes appartenant plutôt aux espèces ayant vécu dans le Lias supérieur : corrodontes, plaques d'oursins, gastéropodes, coquilles fragmentées de lamellibranches, restes d'échinodermes, crinoïdes, débris ferrugineux, spicules d'holoturies.

Surtout des Ostracodes :

N° 2 - Otocythere callosa TRIEBEL & KLINGER - Lias supérieur et Dogger,

N° 3 - Ostracod G. APOSTOLESCO - Aalénien,

N° 4 - Procytheridea sermoisensis APOSTOLESCO - Toarcien supérieur et Aalénien,

N° 5 - Paracypris redcariensis TATE & BLAKE - Hettangien et Pliensbachien,

N° 6 - Ostracod n° 83 KLINGER - Toarcien et Aalénien,

N° 7 - Cytherolloidea cadomensis BIZON - Aalénien,

N° 9 - Bairdia sp. OERTLI - Pliensbachien supérieur et Domérien,

Des Foraminifères :

N° IO et 2I - Dentalina colithica TERQUEM - Lias moyen au Dogger moyen

N° II - Bullopora rostrata QUENSTEDT - Lias supérieur et Malm

N° I2 - Dentalina communis d'ORBIGNY - Lias et Dogger

N° I3 - Falsopalmula deslongchampsi TERQUEM - Lias

N° I4 - Lenticulina d'Orbignyi ROEMER - Lias supérieur et Dogger.

N° I6 - Proteonina ampullacea BRADY - Lias et Dogger

N° I8 et I9 - Thurammina jurensis FRANKE - Lias supérieur et Dogger inférieur.

N° 20 - Uncinulina polymorpha TERQUEM - Lias

N° 22 - Lagena hispida REUSS - Dogger

N° 23 - Cristellaria impressa TERQUEM et BERTH - Lias moyen

N° 24 - Lenticulina toarcense PAYARD - Lias moyen à Dogger moyen

N° 25 - Marginulina triquetra TERQUEM - Lias moyen et supérieur.

N° 26 - Lenticulina münsteri ROEMER - Lias

N° 27 - Lenticulina dochardi TERQUEM - Lias

N° 29 - Astacolus prima d'ORBIGNY - Lias moyen et Malm

c) Dans cette région, au Sud de Besançon d'autres échantillons ont été prélevés au hasard des ouvertures de fouilles et des travaux routiers des Ponts et Chaussées.

- Au sud de Morre, dans le chemin qui joint directement ce dernier village à la Chapelle des Buis. Au-delà de la faille chevauchante, des fondations nous ont fourni des échantillons

(45 et 46) d'une marne blanc-micacée pratiquement intacte, appartenant à l'Aalénien.

- A Clairons, le talus de la D.104, nous a fourni un shale gris-ardoise micacé, juste au dessus des premiers bancs calcaires.

L'étude statistique de ces microorganismes et de ces caractères physiques que nous dépouilleront plus loin semblent confirmer cette hypothèse et par conséquent l'appartenance de ce matériau à un glissement.

Cependant comme aucun argument décisif n'est venu appuyer cette hypothèse, nous avons continué à le considérer comme un échantillon du Charmouthien, ce qu'il devrait être, si l'on ne considérait que sa position stratigraphique.

Une autre tranchée perpendiculaire à cette première, se dirige vers le Nord-Est, contourne le cimetière de Morre à l'Est, puis reprend son "ascension" vers les falaises de Montfaucon qu'elle côtoie à leur pied.

Cette nouvelle tranchée de voirie recoupe toute la série marneuse du Lias dont les couches s'inclinent sensiblement vers le Nord - Nord-Est, avec un pendage de 5 à 10°. Le Domérien supérieur a donné les échantillons 75, 74, 73.

L'échantillon 75 est encore une marne plus ou moins plastique, bariolée; il n'en est pas de même pour les échantillons 73 et 74 qui sont des marnes gréseuses prises sensiblement dans le même banc.

L'échantillon 72 est un schiste carton.

Au dessus, nous entrons dans la zone Toarcien - Aalénien dont les matériaux ont été difficilement distingués du fait du manque de critères paléontologiques. Si les échantillons 67 et 66 sont certainement des marnes toarciennes assez grasses, la distinction devient difficile à faire pour les quatre suivants (65, 64, 63, 62). Ce dernier appartient déjà à une zone où les marnes enveloppent les blocs de calcaires ferrugineux Aalénien provenant des falaises dominant le site.

Pour essayer de préciser la position stratigraphique de ces marnes nous avons fait procéder à une analyse micropaléontologique sur l'échantillon 65, représenté par une marne bariolée brunâtre à grisâtre, qui a donné :

I° - Aphelocythere undulata n. sp. - Lias supérieur et Dogger.

2° - Ostracode n° 56 KLINGLER - Lias supérieur.

3° - Ostracode n° 58 KLINGER - Lias supérieur.

4° et II°
- Othocythere callosa TRIEBEL et KLINGER - Lias supérieur.

5° - Procytheridea magnycourtensis n.sp. - Toarcien

8° - Procytheridea normoisensis APOSTOLESCO - Toarcien et Aalénien

9° - Procytheridea bucki BIZON - Toarcien et Aalénien

I2°- Procytheridea viribilis APOSTOLESCO, MAGNE et MALMOUSTIER - Toarcien

I4°- Nodosoria aff. bafieldensis BARNARD - Aalénien

I5°- Thuramina jurensis FRANKE - Lias

I7°- Marginulina oolithica TERQ - Lias moyen à Dogger

I8°- Lenticulina prima d' ORBIGNY - Lias supérieur

I9°- Planularia crepidula FICHTELL et MOLL - Lias et Malm

20°- Planularia inaequistriata TERQ - Lias inférieur

2I°- Astacolus notutina d'ORBIGNY - Lias moyen à Dogger inférieur

Ces déterminations nous apprennent que nous sommes à la limite Toarcien supérieur - Aalénien inférieur, mais ne les différencie pas; aussi nous classerons ces échantillons indifféremment dans l'un ou l'autre étage.

LA REGION VALENTIN - ECOLE - CHATILLON-le-DUC.

Cette région, située au Nord-Ouest de BESANCON, à la ra-

cine des avants monts, est séparé du faisceau bisontin par une région tabulaire mais très faillée, la zone des plateaux occidentaux, formée par des calcaires du Jurassique moyen.

La zone des avants monts est représentée par une série de brachyanticlinaux à noyaux de Trias et de Lias, elle est séparée au Nord-Ouest de la zone des synclinaux de l'Ognon par la Faille de l'Ognon.

La région Valentin - Ecole, au Sud-Est de Misrey est traversée par une grande faille F_1 direction varisque : la Faille des Rancenières (BONTE 1943), qui abaisse successivement au contact du Lias, le calcaire compact du Bathonien, les calcaires oolithiques, les calcaires à polypiers et les calcaires à entroques du Bajocien. Cette faille a provoqué une réduction de l'épaisseur du Lias surtout en ce qui concerne le Toarcien et l'Aalénien marneux.

A l'Est de "la Faille de Rancenières", le Lias inférieur forme un anticlinal dont le coeur est d'âge lotharingien. Encore à l'Est de ce dernier anticlinal, une nouvelle faille F_2, probablement parallèle à la précédente, élève un nouveau compartiment en mettant le Lias inférieur marneux au niveau du Lias calcaire.

Valentin.

C'est ce dernier compartiment qui au Nord de Valentin dans les travaux d'agrandissement d'une sablière, nous a donné une belle coupe dans l'Aalénien inférieur.

Les échantillons 68, 69, 70, 71, sont des marnes micacées jaunâtres présentant des lits ou des nodules calcaréo-gréseux micacés, oxydés. L'échantillon 71 est une argilite particulièrement remaniée, semble-t-il, du fait de sa présence dans une zone à venues d'eau.

Ecole.

La Nouvelle Marnière appartenant à la Tuilerie d'Ecole qui exploite les couches de l'Aalénien inférieur au Nord-Ouest de la faille de Rancenières, nous a donné des échantillons de

même facture, (84, 85, 86, 87, 88, 92); ce sont la plupart du temps des shales jaunâtres finement lités, micacés, gréseux, ne présentant pas de traces d'organismes.

L'ancienne Marnière, un peu plus au Nord qui exploitait les couches du sommet du Toarcien, donne au contraire une multitude de fossiles, dont de nombreuses ammonites.

Les marnes sableuses micacées, grises à Lytoceras jurensi, (échantillons 89, 90, 91), sont relayées vers le haut de la carrière par les couches à Harpatoceras insigne SCHUBLER, avec des Phlyseogrammoceras dispansum LYCETT. C'est un banc de calcaire marneux avec quelques oolithes ferrugineuses, se délitant en fragments irréguliers.

Accompagnant ces ammonites on a relevé de nombreux :

- Nucula hammeri GOLDF
- Turbo capitaunius
- Littorina duplicatu SOW, et
- Trochus subduplicatus.

Un sondage de cette Marnière a relevé 120 mètres de sédiments marneux, représentant la série du Charmouthien inférieur, Toarcien Supérieur compris, ce qui révèle une nette réduction d'épaisseur.

Chatillon-le-Duc.

A l'Ouest de la faille de Rancenières, un ilot de calcaire Bajocien et Aalénien domine le talus liasique, réduit, représentant ce qui reste du flanc inverse, d'un anticlinal à noyau de Keuper, l'anticlinal de Chatillon (BONTE 1943).

Cette zone nous a fourni un échantillon (9) d'une argilite feuilletée noire, très organique à minces intercallations tourbeuses appartenant probablement au Domérien inférieur de la zone à Amaltheus margaritatus.

LANTENNE-VERTIERE.

A 20kms environ à l'Ouest de BESANCON, dans une zone où la tectonique est encore fort complexe, la Tuilerie de Lantenne exploite les couches de l'Aalénien inférieur.

Celui-ci présente une épaisseur de 30 à 40 mètres. Ce sont des marnes, bleues, compactes à cassure conchoïdale (échantillons 04, 05, 06), devenant de plus en plus jaunâtres et sableuses au fur et à mesure que l'on s'élève vers le sommet de la carrière. Exposées à l'air, elles se délitent en une infinité de plaquettes d'une épaisseur de l'ordre d'un millimètre. Le mur de la carrière nous a fourni de nombreuses Dumorteria levesquei.

LA REGION DU PIC SAINT-LOUP.

Au Nord de Montpellier, le Pic Saint-Loup est un anticlinal chevauchant vers le Nord un synclinal crétacé. La terminaison périclinale de ce chevauchement est constituéepar des marnes liasiques.

Le Domérien inférieur y est représenté par des marnes et marno-calcaires jaunâtres, surmonté par les marnes noires bien feuilletées du Domérien supérieur. Ces marnes englobent de nombreux nodules calcaréo-marneux et des bancs de calcaires noirs s'y intercalant.

Au-dessus des bancs de calcaires noirs de 15 à 20 cm, à poissons, se développe la série marneuse du Toarcien et de l'Aalénien inférieur. Ce sont des Marnes noires et schisteuses se délitant en grandes plaquettes, souvent recouvertes d'un enduit bitumineux, équivalent des "schistes cartons" du Nord-Est de la France.

Elles sont surmontées par des marnes grises micacées, feuilletées à fossiles pyriteux qui deviennent plus claires quand on aborde l'Aalénien.

Ces marnes qui fournissent une faune en tout point équivalente à celle des marnes de Franche-Comté ont, semble-t-il, une paléogénèse très semblable à ces dernières.

Deux échantillons ont été prélevés, l'un dans la zone à Amalthaus margaritatus (Echantillon 130), l'autre dans la zone à Hildoceras bifrons (Echantillon 131), dans le souci d'amorcer un parallèle quelconque entre des échantillons de même âge, mais de provenances très éloignées l'une de l'autre, à partir de nos méthodes d'étude.

LE JURASSIQUE SUPERIEUR MARNEUX A BESANCON.

SITUATION GEOGRAPHIQUE

Les marnes dessinent une bande plus ou moins large partant du quartier de Palente, contournant le Mont de Bregille par le Nord-Ouest ; après avoir remonté le Doubs sur sa rive droite, par la Gare de la Mouillère, la combe marneuse franchit le fleuve à l'endroit où la boucle qu'il vient d'amorcer, s'étrangle au Nord-Est de la Citadelle à l'entrée du Faubourg Rivotte. La combe se poursuit en aval aux pieds des côtes de Chaudanne et de Planoise, qu'elle longe sur leur flanc sud, après avoir franchit une nouvelle fois le fleuve à la sortie de sa boucle.

DESCRIPTION GEOLOGIQUE

a) Le Callovien.

Le Callovien a été dégagé dans les travaux d'élargissement de la R.N.73, ainsi que dans les travaux de voirie exigeant le percement de tranchées à la hauteur du Petit Palente. Ce sont des marnes jaunes (échantillons II0 et III) qui en montant dans la série, font place à des marnes grises à oolithes ferrugineuses, (échantillon II2). Un sondage effectué à Petit Palente nous a donné un échantillon tout à fait semblable (n° I24) à 6,60 mètres.

Le Callovien marneux se retrouve rue de la Mouillère. Des sondages effectués dans le cadre des travaux d'agrandissement d'une entreprise, ont fourni des échantillons pris, vers 8 et 9 mètres et se présentant sous la forme de marnes grises avec parfois des Oolithes ferrugineuses. Ces marnes se trouvent très certainement à la limite callovo-oxfordienne, mais faute d'arguments paléontologiques, nous n'avons pu les situer avec précision et nous nous sommes résolus à les placer arbitrairement dans l'Oxfordien.

b) L'Oxfordien.

Cet étage est représenté à BESANCON par un grand nombre d'affleurements. Les deux marnières abandonnées de BESANCON-PALENTE, nous ont donné de nombreux échantillons de l'Oxfordien moyen et supérieur (échantillons 78,79, 80, 8I, 82,.83, et 95). Les couches ont un pendage de I0 à I5° vers l'Est. L'Argovien appa-

rait à l'Est, au contact.

De nombreux fossiles pyriteux ont été recueillis dans ce gisement trop classique pour que nous les décrivions ici.

En se dirigeant vers le centre de la ville, on passe au large de la Tuilerie du Vernois, autre marnière abandonnée exploitant jadis la couche supérieur de l'Oxfordien.

Deux échantillons (93 et 94) ont été extraits de deux cicatrices de glissements. Ce sont des Shales marneux bariolés, très altérés avec de très nombreux cristaux de gypse, démontrant un profond remaniement d'ordre physico-chimique.

La rue de la Mouillère à fourni des carottes de sondages (échantillons II3, II4, II5). Le quartier de Clair Soleil, en pleine expansion démographique, voit s'élever depuis trois ans, un grand nombre de constructions à caractère collectif. Les fouilles, les ouvertures de routes, précédant ou accompagnant les travaux, ont défini un site intéressant pour nos échantillonages.

Les prélèvements (I à 3), effectués dans les fouilles d'une tour, ont été extraits des couches de l'Oxfordien supérieur où apparaissent déjà des intercalations calcaires et des alignements de nodules calcaireux.

Elles sont immédiatement surmontées des couches de l'Argovien marneux, représenté par des marnes bicolores sableuses (échantillons 97, II6, II8). Le batiment P.S.R. B3, à l'Ouest de la tour, a vu ses fouilles ouvertes dans un paquet d'Argovien complètement remanié (échantillon 96) ayant glissé sur les couches supérieures de l'Argovien.

De nombreux autres points ont fourni des échantillons de marnes de l'Oxfordien supérieur :

- Une tranchée de voirie à **Boussières**, dans les couches à nèches de l'Oxfordien supérieur (échantillon IO).

- L'ancienne Marnière d'Epeugney (échantillon II et I2).

- L'ancienne Marnière de la Tuilerie sur la N.67, un peu avant Ornans (échantillons I5 et I6).

- L'ancienne Marnière de Tarcenay (échantillons I7 et I8).

- Le talus de la R.N. 473 allant de Clairons à Fortans nous a donné des échantillons d'une marne jaunâtre (échantillons I3 et I4), à miches, probablement issue des couches supérieures de l'Oxfordien.

- Un peu au Sud, de Belfort à Grandvillers, un sondage profond de recherche d'eau a atteint les couches marneuses de l'Oxfordien et nous a fourni deux échantillons :

- échantillon I23 à la côte - 213,80 mètres

échantillon I28 au-dessous d'un niveau calcaireux à Oolithes, pour lequel aucun argument paléontologique ne nous a permis d'affirmer son appartenance à l'Oxfordien ou au Callovien.

Ce sont des marnes se délitant en petites plaquettes grises, silteuses et micacées très compactes. Dans cette série on a pu constater une lacune de faciès argovien tel qu'il est connu en Franche-Comté.

- Sondages effectués sur le tracé du canal du Rhône au Rhin en vue de son passage sous "la Citadelle" de BESANCON.

Des carottes de ces sondages nous avons pu extraire quelques échantillons caractéristiques.

- Velotte S.IO. Ce sondage en aval de la boucle du Doubs à BESANCON et sur la rive droite au pied de la Citadelle, a donné trois échantillons (I20, I2I, I22), prélevés aux profondeurs de 7,30 mètres, 8,80 mètres et II,IO mètres; ce sont des marnes grises compactes de l'Oxfordien.

- Avanne S.I. En aval du précédent, ce dernier nous a également donné trois échantillons d'Oxfordien représentés par des shales marneux, gris compacts, prélevés à 9,60 mètres, II,IO mètres et I4,50 mètres.

- Le Séquanien marneux, rare et en mauvais état à l'affleurement, nous a été fourni par un échantillon (8) de la route N.P. 46I BESANCON-MORTEAU, dans un talus de la tranchée de la route du Valdahon.

En outre les sondages du canal du Rhône au Rhin nous ont fourni là également, des échantillons du Séquanien et du Kimméridgien dont les couches, constituant la retombée méridionale de l'anticlinal de la Citadelle, ont des pendages importants variant de 35 à 70° vers le Sud.

Les sondages 524 et 29, implantés au bord de la N.P. 83, au droit de l'Ile Malpas à la hauteur de l'usine à gaz et Casamène , ont permis trois prélèvements :

- S 29, les échantillons I00 et I02 prélevés respectivement à I0,I0 mètres et 23,30 mètres. Le premier est une marne beige clair à nodules calcaires, le deuxième une marne grise compacte.

- S 24, l'échantillon I03 à I5,20 mètres et qui ressemble trait pour trait à l'échantillon I02.

A Casamène (Velotte S I) l'échantillon II9 prélevé à I3,50 mètres nous a donné une marne grise compacte à cailloux calcaires.

Le Kimméridgien a été rencontré dans le sondage S 6, à des profondeurs de 8,80 mètres et I0,50 mètres.

Implanté en contre bas de la N.P. 67 BESANCON-PONTARLIER et en amont de la boucle du Doubs à BESANCON, ce sondage a donné deux échantillons :

- Le I06 est une marne à Exogyres, gris-brunâtre à nombreux cailloux calcaires crayeux.

- Le I07 est une marne beige claire à taches brunes et nombreux éclats d'huitres, semblable à bien des titres à l'échantillon I00 du Séquanien.

0

0 0

III - DESCRIPTION MICROSCOPIQUE DES ECHANTILLONS ETUDIES.

Il n'est pas dans notre propos de prendre les échantillons et de les analyser un par un dans les lignes qui suivent. L'énumération et la description en seraient fastidieuses; en outre nos conclusions ne pourraient que corroborer celles des travaux précédents sur ce sujet (M. DREYFUSS 1935 et 1938). Nous avons plutôt cherché à faire émerger de la masse, certains échantillons dont les caractères microscopiques paraissaient être représentatifs d'un groupe de marnes, d'un étage.

L'étude s'est faite sur des lames minces après inclusion, sur des surfaces polies, ou encore sur des résidus de lavage. Nous avons cherché a établir des relations approchées de position et de quantité entre les trois éléments cardinaux des préparations observées, soit :

- La phase carbonatée
- La phase détritique
- Les minéraux accessoires ou de néoformation

En même temps nous donnons, quand cela est possible, un aperçu sur la microfaune et la microflore.

A - LE LIAS

I°) Charmouthien.

a) De nombreux échantillons prélevés à la Chapelle des Buis (39, 41, 43). à Pugey (21), ou encore à Morre (77) se présentent sous la forme de shales marneux, gris bleutés, représentant généralement le Domérien inférieur.

L'examen microscopique de ces matériaux révèlent :

- Du Quartz assez peu abondant (10 à 30 %) et de petites dimensions, généralement 5 microns.

- Le mica y est relativement peu abondant, en paillettes de 10 à 20 de long.

- La calcite se présente en plages recristallisée, plus ou moins grandes.

- Des concrétions de limonites, des cristaux de pyrite bien cristallisés abondent.

- La microfaune est assez rare.

Le tout est noyé dans une pâte très fine, abondante (70 % en moyenne), faiblement birefringente dans les teintes du premier ordre.

b) Les couches inférieures des Marnes à Plicatules sont représentées par des marnes compactes, gris-brunâtres, pouvant virer au roux (75).

- Les minéraux détritiques y sont peu abondants; le Quartz est rare, très fin. Il se présente parfois sous la forme de grains conséquents (50 M) à bords émoussés.

- Le mica est très rare.

- La calcite est représentée par des grains individualisés, ou en plages.

- De gros nodules cylindriques de marcassite sont fréquents ainsi que des concrétions limoniteuses et pyriteuses.

Ces minéraux sont noyés dans une pâte très développée, calcaire, partiellement teintée par la limonite.

La microfaune est abondante : Radioles d'oursins, plaques d'échinodermes, articles de crinoïdes, valves d'ostracodes, des foraminifères.

c) Les couches supérieures (échantillons 73, 74) voient par contre le rôle de la pâte diminue considérablement.

- Les minéraux détritiques y sont au contraire très abondants, sous forme d'éléments assez gros, souvent rassemblés en agrégats assez peu émoussés, teinté par la limonite.

- Le mica abonde également.

- La calcite, le plus important des minéraux secondaires, se confond facilement par sa taille avec le quartz.

- Les concrétions de pyrite, de limonite sont abondantes, souvent fuselées.

Au contraire des lames représentant les niveaux inférieurs, la microfaune est rare.

2°) Les Marnes à Trochus du Toarcien et de l'Aalénien.

Les couches à Hildoceras bifrons, (échantillons 20 et 47), qui se trouvent intercalées entre des marnes à Trochus au dessus et des "schistes cartons"au dessous, se présentent sous la forme de marnes gris-bleues, noires quand elles sont humides, plastiques.

- Les éléments détritiques sont rares, avec quelques micas. Le Quartz est plus abondant dans certains échantillons remaniés (échantillon 4) sous des formes usées, irrégulières.

- Au contraire, les niveaux secondaires sont abondants avec des grains de calcite, de dolomie, et de la pyrite, cette dernière sous forme de plages irrégulièrement réparties et pouvant atteindre plusieurs millimètres.

- Des nodules de limonite voient leur fréquence varier avec le degré de remaniement.

- La calcite est présente en grains isolés rhomboedriques ou sous forme de traînées.

La faune est représentée par quelques articles d'encrines et de nombreux débris de lamellibranches.

La pâte,moyennement abondante (moins de 50 %) est très peu calcaire, puisque entièrement amorphe et légèrement floconneuse.

Le Toarcien supérieur est représenté par des marnes compactes siliceuses et micacées, gris-bleutées ou jaunâtres, (échantillons 89, 90, 91).

Le Quartz est assez peu abondant, 10 %. De petites dimensions,il se présente souvent en agrégats gréseux, ou en cristaux de forme irrégulière.

- La muscovit est abondante.

- Des minéraux secondaires, la limonite et surtout la pyrite à petits globules, sont les plus souvent abondants, se présentant en grains et en concrétions de petites tailles. La calcite existe également en petits grains répartis irrégulièrement.

La pâte est extrêmement dense (plus de 80 %), et irrégulière, puisque isotrope et quelque peu floconneuse; la calcite y est plus ou moins régulièrement répartie, en petits cristaux isolés (5 N) qui s'éclairent isolément dans le fond argileux.

Les marnes aaléniennes présentent la plupart du temps le facies gréseux, (échantillons 68, 69, 84, 85, 86, 87, 92).

- Le Quartz est assez abondant, grossier, émoussé, (40 %). Le mica peut être en quantité très variable selon les échantillons.

Les minéraux secondaires sont peu nombreux : calcite sous forme de cristaux parfois très bien cristallisés dans les fissures, concrétions de pyrite et limonite très abondantes.

La pâte (50 %) a un aspect grumeleux.

B - LE JURASSIQUE SUPERIEUR

I°) Callovien

Les marnes grises à jaunes, à oolithes ferrugineuses, au dessus de la Dalle nacrée présente à l'examen microscopique :

- Le Quartz moyennement abondant, sous des formes irrégulières, de taille assez grande, 60 N, environ.

- Les minéraux secondaires assez rares sont représentés par des concrétions de limonite, d'oligiste et de la calcite; celle-ci forme la pâte : c'est une mosaïque de grains extrêmement fins.

Quand les oolithes existent elles sont composées essentiellement de limonite et le calcaire en amas périphériques les envahit parfois.

La roche est pétrie d'organismes brisés.

2°) Oxfordien

Les marnes de l'Oxfordien présentent des caractères très homogènes.

La pâte est souvent marquée par l'abondance de petits cristaux de calcite illuminant le fond isotrope.

- Le Quartz y est assez abondant, les grains sont uniformes, de petite dimension sous forme d'éclats irréguliers. Il se groupe parfois en agrégats gréseux.

- Le mica est rare quand il n'est pas totalement absent.

- Des sphérules de pyrite, des nodules cylindriques de limonite, de la magnétite en forme de croûte, irrégulièrement réparties représentent les minéraux secondaires.

- Le gypse bien cristallisé apparaît dans les échantillons remaniés (93, 94).

La pâte présente un aspect légèrement grumeleux, teintée par la limonite quand celle-ci est abondante.

La microfaune est rare, quelques valves d'ostracodes, des foraminifères.

3°) Argovien

Une marne grise, (échantillon II8) présente les mêmes caractères microscopiques que les échantillons d'Oxfordien.

Les marnes sableuses ocres, montrent généralement plus de Quartz et également plus de pyrite.

4°) Séquanien

Les marnes gris bleues du Séquanien (échantillons I02, I03) montrent en lame mince une multitude de petits grains de Quartz aux angles vifs, qui donnent à la roche un aspect gréseux.

Les minéraux secondaires paraissent très variés : calcite, glauconie, calcédoine et des concrétions de limonites.

La pâte est fine et très calcaire. Les organismes sont rares.

Au contraire de ces dernières, les marnes beiges (échantillon I00), du même étage se caractérisent par une absence quasi totale de Quartz.

La roche est en général très uniforme, composée d'une pâte fine homogène et de teinte claire; les minéraux de formations secondaires sont très variés : calcite sous forme de rhomboèdres ou en grains irréguliers de petites dimensions, limonite, pyrite.

5°) Kimméridgien

Les marnes grises du Virgulien présentent peu de différences avec les marnes beiges à l'aspect crayeux (échantillons I06 et I07).

La pâte est ici encore très développée; assez grossière elle occupe jusqu'à 70 % de la surface des lames minces; l'argile apparaît isotrope et floconneuse mais elle est constellée de petits cristaux de calcite, accumulés sans être engrenés.

Le Quartz est assez rare, composé de grains assez volumineux et subanguleux.

La pyrite sous forme de sphérules, des grains de magnétite ainsi que la calcite, en rhomboèdres bien développés, sont dispersés dans la roche.

Les microorganismes sont clairsemés au contraire des débris de lamellibranches qui, sous la forme des exogyres envahissent les préparations.

C -CONCLUSIONS et INDICATIONS RELATIVES à la SEDIMENTATION.

Que ce soit pour les marnes du Lias ou celles du Jurassique, les conclusions qu'on peut dégager sont les mêmes. On constate une grande unité de structure.

La pâte est toujours bien développée, les éléments détritiques peuvent être très bien représentés, mais généralement ils ne le sont que modestement; les éléments néoformés sont constants.

Des analyses précédentes, on peut en déduire que les sédiments étudiés, sont des dépôts de mer peu profonde révélant une oscillation continuelle de la zone néritique. La mise en place de ces dépôts a été le plus souvent perturbée par les courants marins distribuant les éléments détritiques.

Exceptionnellement, au Lias supérieur, la présence de grains de quartz très fins et bien calibrés, indique la superposition d'un apport éolien et donc d'un recul du domaine continental, par rapport à la zone de dépôt.

Les sédiments marneux de la série jurassique ont donc connu un processus de genèse monotone. Les concrétions de sédimentation, ont été celles de vases très sulfureuses et de boues déposées en milieu peu calcaire au cours du Lias, beaucoup plus durant le Jurassique supérieur.

IV - PROCESSUS PHYSIQUE ET CHIMIQUE DE LA SEDIMENTATION

D'après des études très récentes (MILLOT 1964), trois grandes opérations procèdent à la sédimentation argilo-calcaire en milieu marin.

I°) Dans un premier temps, les minéraux lessivés des continents voisins, transportés par les fleuves puis par les courants marins, déterminent un apport détritique : il y a héritage détritique.

En dehors des Quartz, certaines de ces argiles allochtones sont conservées intactes après leur dépôt, du fait de leur stabilité en milieu marin normal.

Parmi ces argiles détritiques stables il y a la Kaolinite, l'Illite, et la Chlorite, bien cristallisées.

2°) Les minéraux argileux moins stables subissent contemporainement des transformations dues à des facteurs physico-chimiques inhérents au milieu marin.

3°). Les sédiments, une fois déposés, s'enfouissent et sont livrés à la diagénèse. Là encore les transformations postsédimentaires ou néoformations sont difficiles à saisir et dépendent pour une grande part, de déséquilibres chimiques, dans la masse du sédiment.

Cette vue d'ensemble nous permet d'avoir une idée sur la complexité de la question.

Cependant le problème se complique dès que l'on envisage la nature de la sédimentation. Des études prennent comme point de départ la nature des matériaux apportés aux bassins de sédimentation et plus précisément les sédiments marins actuels tels que les boues, ont donné de nombreux renseignements et amené les auteurs à émettre des hypothèses assez différentes les unes des autres, mais possèdant toutes des arguments positifs.

a) Certains (M. MILLOT 1949) sont partisan des néoformations.

b) D'autres comme GRIM (1949), constatent une augmentation de la teneur en Illite par rapport à la Kaolinite, dans des vases marines prélevées de plus en plus vers le large et pensent à des transformations.

d) RIVIERE (1951) constate qu'une telle observation est constradictoire avec le fait connu de la très grande inertie chimique de la Kaolinite et émet l'hypothèse qu'en bordure des bassins, la vitesse des eaux affluentes, chargées d'éléments détritiques et à la limite de leur capacité de transport, diminue brusquement entraînant une chute brusque de leur "compétence" vis-à-vis des sédiments transportés. Il en résulte un dépôt rapide se faisant pratiquement sans aucune espèce de lévigation. Plus au large, la sédimentation se fera par décantation et les minéraux ultra fins de suspension auront de grandes chances d'être éliminés par les moindres déplacements d'eau. Dans les observations faites par GRIM, la Kaolinite restant plus longtemps dispersée du fait de son inertie, serait entraînée selon le courant. Par opposition, l'Illite floculant beaucoup plus facilement, son dépôt peut s'effectuer sans

qu'un classement par lévigation intervienne.

Il serait absurde d'opposer ces diverses conceptions; en fait, tous ces mécanismes, transformation pendant le transport, différenciation mécanique, néoformation, doivent s'associer à des degrés plus ou moins importants selon la nature physico-chimique de l'aire continentale originelle et celle du milieu marin.

V - NATURE DE L'ARGILE ET TRANSFORMATIONS.

Aucune analyse n'a été faite dans ce sens, d'une part parce qu'il aurait fallu mettre en oeuvre des moyens matériels importants, d'autre part une étude systématique de ce genre aurait largement débordé du cadre de notre travail.

Cependant, les analyses faites par MILLOT (1949 et 1953) sur des sédiments marneux de la série jurassique de Lorraine, pour une grande part identiques à ceux que nous avons étudiés, ont démontré :

1°) La présence constante de l'Illite généralement dominante.

2°) La présence relativement fréquente de la Kaolinite.

3°) Celle de micas hydratés du groupe Vermiculites, à titre de minéraux accessoires.

Ces dépôts d'Illite et de Kaolinite sont représentés par des argiles à marnes bleues ou grises à fréquentes alternances rythmiques de couches plus argileuses ou plus calcaires caractéristiques des eaux marines liasiques.

Cependant la présence assurée de ces argiles à trois couches n'est pas un caractère obligatoire. A titre d'information, nous pouvons signaler que M. URBAIN (1951), étudiant les formations marines du Lias et de l'Oolithique du Calvados, constatait la présence constante de l'Halloysite, accompagnée le plus souvent par la Kaolinite, l'existence d'autres silicates hydratés n'ayant pu être mis en évidence.

Pourquoi la présence de cette Halloysite ? Indirectement, on peut répondre par l'intermédiaire de M. MILLOT (1964) qui

a effectué une étude très poussée des transformations invisibles auxquelles sont sujettes les argiles à deux et trois couches.

a) Les cas les plus fréquents concernent les minéraux à deux couches :

Illite	M. interstratifié	Illite-Vermiculite
Illite	Vermiculite	
Illite	Montmorillonite	
Illite	Chlorite	

b) Les cas de transformation de type Kaolinique à deux couches sont beaucoup moins connus :

Kaolinite	Kaolinite désordonnée
Kaolinite	Halloysite
Halloysite	Kaolinite désordonnée

c) Le cas limite étant le passage d'un minéral à deux couches, à un minéral à trois couches et inversement.

Illite	Kaolinite

Ainsi, en ce qui concerne nos sédiments marins, outre l'association Illite-Kaolinite pratiquement certaine, il ne serait nullement surprenant que des analyses thermiques différentielles ultérieures, ne révèlent certaines quantités de ces argiles issues de transformations ou de néoformations.

VI - MANIFESTATIONS DU REMANIEMENT.

Ni le terme d'altération, ni celui de remaniement ne signifient rien de bien précis : on a vu que lors même de son dépôt, déjà le futur sédiment est déjà en proie aux remaniements de toute sorte.

Si l'on veut reprendre schématiquement l'histoire du sédiment, on peut dégager à ce stade une phase de jeunesse pendant laquelle il fortifie sa cohésion, acquiert ses caractères spécifiques essentiels. La maturité du sédiment correspondrait à son enfouissement progressif.

L'altération proprement dite signifiant un stade de vieillissement, les caractères physico-chimiques vont alors dans le sens d'une dégradation, dégradation qui peut être dissimulée par l'apparition de propriétés exceptionnelles faisant suite par exemple à la néoformation d'une montmorillonite.

Ces dégradations prennent deux formes : l'altération chimique et l'altération mécanique.

L'altération est essentiellement liée à des facteurs climatiques : température, rythmes et amplitudes des variations climatiques, gel, eau de ruissellement, eaux météoriques.

Parmi ces facteurs, le gel joue un rôle essentiel : MM. MIELENZ et KING (1955) ont pu mettre en évidence que la structure la plus favorable au gonflement par le gel se situe entre celle des sables fins ou silts grossiers et celle des argiles consistantes; ces dernières interdisent la formation des lentilles de glace en raison de leur perméabilité extrêmement faible. Or, l'on verra que les sédiments que nous avons étudiés, se placent dans cette fourchette.

Les remaniements peuvent se traduire de plusieurs façons :

I°) En place, le sédiment marneux prend au voisinage du sol et à l'affleurement des teintes ocres, virant bientôt au rouille.

Ces variations de couleurs manifestent une altération en place due à des causes chimiques se traduisant par l'échange de absorbés, et le développement de minéraux de néoformation. A cette action purement chimique se superpose une intense activité biochimique due aux racines, aux organismes fouisseurs, aux bactéries. L'activité bactérienne modifie non seulement la matière organique du sédiment, mais parfois son substrat minéral. Les bactéries agissent directement sur le sédiment en faisant la synthèse de nouveaux produits, tels que l'ammoniaque ou le gaz carbonique qui en alcalanisant ou acidifiant le milieu, affectent à leur tour la solubilité des corps constituant le sédiment.

Ces phénomènes chimiques et biochimiques sont plus ou moins sensibles selon les rythmes, l'amplitude, l'humidité des saisons.

Les humidifications répétées suivies d'un séchage modéré (fréquents dans les climats tempérés) tendent à exalter les propriétés plastiques de l'argile : la pénétration de l'eau à

l'intérieur des particules, suivie d'un départ partiel, tend à affaiblir les liaisons entre les feuillets et à faire varier négativement la rapidité d'échange d'un matériau argileux.

Finalement, le sédiment perd sa consistance, il devient granuleux et poreux : la perméabilité qui en résulte ne fait qu'agraver la dégradation du sédiment.

2°) L'altération entraînant rapidement un glissement ayant affecté une pente argileuse. Un remaniement mécanique, en dissociant les particules accèlère alors en le favorisant, le remaniement chimique, biochimique et physique. Les altérations seront dans ce cas, beaucoup plus rapides que dans le cas de remaniements sur place.

3°) Il n'est pas rare, à l'occasion de fouilles de voir un panneau de marne s'écrouler par simple gravité, sans qu'aucun processus physique ou chimique ne soit intervenu au départ du glissement. Dans ce cas, il est clair que nous n'avons affaire qu'à remaniement mécanique.

Nous avons pu constater, au sujet des remaniements, que les marnes du Lias étaient beaucoup plus facilement altérées que celles du Jurassique supérieur; or ces dernières ont une teneur en calcium beaucoup plus importante. Tout se passe comme si le $Co_3 Ca$ contribuait à la protection du sédiment en lui donnant un squelette et donc une certaine cohésion. En cas de décalcification, fréquente dans les marnes du Lias échantillonnées vers la surface du sol, le sédiment se comporte comme une argilite dont le remaniement entraîne des glissements.

o o o o

DEUXIEME PARTIE

E T U D E G E O T E C H N I Q U E

I - INTRODUCTION A L'ETUDE GEOTECHNIQUE D'UN SEDIMENT ARGILEUX

Une argilite est un agrégat de particules microscopiques et ultramicroscopiques provenant de la décomposition chimique des constituants du sol. Une marne n'est autre qu'une argilite comprenant une proportion importante d'éléments calcaires. Elle prend naissance lorsqu'un dépôt de l'argile se superpose en dépôt de débris calcaires (coquilles, tests); ces débris n'étant pas susceptibles de se fractionner indéfiniment, la granulométrie d'une marne comportera une proportion importante d'éléments plus gros que ceux des argiles. La fraction fine de ce type de formation meuble est dominée par la fréquence des particules en forme de paillettes, résultant des processus géologiques qui ont donné naissance à ces sols.

En effet, comme on a pu le voir précédemment, les argilites qui nous intéressent sont formées majoritairement par l'héritage de roches préexistantes. Ces dernières sont constituées en partie par des minéraux chimiquement très stables, et en partie par des minéraux moins stables. La décomposition chimique de ceux-là, les transforme en une masse friable de très petites particules constituées de minéraux secondaires ayant généralement une structure en lamelles ou en paillettes.

Ainsi le processus d'altération chimique transforme la roche mère en un agrégat de fragments pratiquement inaltérés, noyés au milieu d'un ensemble de particules distinctes. Au cours du transport ultérieur par les fleuves, puis les courants marins, l'agrégat est dispersé, ses constituants soumis à l'effet d'attrition, ce phénomène ne parvenant jamais à amener la taille des minéraux inaltérés au-dessous de 0,01 millimètre; ce qui n'est pas le cas des particules altérées, donc friables, qui sont réduites en une fraction très fine, constituée par conséquent de minéraux secondaires.

La silice est l'un des principaux constituants des argiles qui sont, au point de vue minéralogique : des silicates d'aluminium hydratés, qui contiennent de la silice le plus souvent sous forme colloïdale et des sesquioxydes de formule générale R_2O_3.

Si les caractéristiques mécaniques des gros éléments : graviers, sables et des fins limons, sont identiques pour des formations meubles différentes, il n'en est pas de même pour les éléments très fins : argiles et ultraargiles, dont les propriétés peuvent différer très sensiblement.

Ces différenciations ne peuvent s'expliquer qu'en tenant compte de deux facteurs : l'eau d'adsorption et les forces se développant à la surface des particules du sédiment.

La surface de chaque particule du sol porte une charge électrique négative. L'intensité de la charge dépend en grande partie de la nature minéralogique de la particule. Les manifestations physiques et chimiques liées à la charge superficielle constitue l'activité du minéral : elle est faible ou forte suivant l'intensité de la charge.

A l'état naturel, chaque particule est entourée d'une pellicule d'eau. En raison de la polarisation des molécules d'eau, la charge négative située à la surface de la particule attire les cations hydrogènes de ces molécules; ce qui entraîne une disposition bien déterminée de celles-ci, à la limite eau.solide.

Au-delà de cette zone, à une certaine distance de la frontière entre la particule et l'eau, la structure moléculaire reste influencée par l'action des chaines moléculaires et constitue la couche adsorbée.

Ce film d' au, à l'intérieur de la couche adsorbée, a des propriétés physiques très différentes de celles de l'eau libre à la même température. C'est ainsi que cette eau adsorbée n'est pas touchée par l'évaporation au-delà de 100 degrés; puisqu'aucune évaporation ne peut être constatée, il faut que la pression de vapeur saturante émise par l'eau d'adsorption soit égale à celle de la vapeur dans l'air ambiant.

Ceci peut s'expliquer par l'augmentation de concentration de la solution constituant la couche adsorbée et surtout par les

phénomènes de liaison moléculaire cités plus haut.

A la surface de la particule, l'eau adsorbée a donc les propriétés d'un solide, puis celle d'un liquide visqueux. Cette viscosité diminue au fur et à mesure que l'on se dirige vers l'extérieur de la couche adsorbée.

Outre les propriétés physiques très particulières à la couche adsorbée, celle-ci connait une intense activité chimique en assimilant des cations hydrogènes H en provenance de l'eau, des acides et des cations métalliques.

Ces cations attirés dans la couche adsorbée par la charge négative de la surface de chaque particule, constituent le complexe d'adsorption, où est procédé, sous le nom d'échange de base, au remplacement de certains cations par d'autres.

Les propriétés physiques et l'épaisseur de la couche adsorbée dépendent pour une large part, du caractère chimique du complexe d'adsorption.

Ce caractère chimique paraît être lié d'une façon primordial à la dimension des particules; au fur et à mesure que la granulométrie diminuera, il occupera une part croissante du volume total et influera donc pour une part plus importante sur les propriétés physico-chimiques de l'argile.

CONCLUSION

Tout ceci n'a été dit que pour montrer l'extrême importance du rôle que joue la couche adsorbée des particules de la fraction argileuse et par conséquent la nature minéralogique de celle-ci, sur les propriétés physiques et mécaniques des sédiments que nous étudions.

II - DEFINITION DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES UTILISEES COMME PARAMETRES

Les qualités d'un sédiment peuvent différer qualitativement de par sa texture, sa structure, sa consistance et quantitativement par sa teneur en eau, par sa porosité, et sa compacité relative.

Si les renseignements qualitatifs peuvent être fournis par un examen microscopique ou même macroscopique, les renseignements quantitatifs ne peuvent être donnés que par des essais mécaniques.

Dans le cas qui nous intéresse : celui des marnes de la série jurassique, l'examen macroscopique n'apporte que peu de renseignements du fait de la structure à éléments fins et très fins à laquelle on a affaire. L'examen microscopique se heurtant à de grandes difficultés pratiques comme nous l'avons vu, les essais au laboratoire apporteront la plus grande part dans la détermination géotechnique.

On note les paramètres suivants :

- 1°) La teneur en eau We

C'est la perte de poids en eau d'un échantillon, exprimée en pourcentage de la matière solide sèche.

- 2°) Poids spécifique g

C'est le poids volumétrique des grains constituant le materiau. C'est-à-dire le poids d'un volume égal à l'unité; il se détermine au moyen d'un picnomètre.

- 3°) Poids spécifique apparent ou densité humide.

C'est le poids volumétrique apparent du sédiment à l'état naturel, soit le poids de l'unité de volume de l'échantillon intact que l'on mesure dans un vase de BOUDREAUT. Il dépend du poids spécifique des constituants solides, de la porosité du matériau et de son degré de saturation.

Si n est la porosité

e le poids spécifique de l'eau
g le poids spécifique du matériau

On a déterminé la densité humide par la relation,

$$h = (I - n)\ g + n\ e$$
$$= g - n\ (g - e)$$

- 4°) Porosité n

C'est le rapport du volume des vides au volume total de l'agrégat. Si cette porosité est exprimée en pourcentage, on lui donne le nom de pourcentage des vides.

- 5°) Indice des vides e

C'est le rapport du volume des vides au volume de la substance solide. Il est lié au pourcentage des vides par les relations.

$$e = \frac{n}{I-n}$$

et

$$n = \frac{e}{I+e}$$

La porosité dépend en grande partie de la forme des particules, elle ne renseigne qu'imparfaitement sur la compacité d'un sédiment : c'est-à-dire le fait que les grains, dont est constitué le sédiment, laissent entre eux plus ou moins d'interstices.

- 6°) Compacité C

Elle est définie par la relation
$C = I - n$

Plus un sol est compact, moins il est compressible, plus les tassements sont négligeables et plus son angle de frottement est grand.

- 7°) Teneur en carbonate de calcium et en matières humiques

Nous verrons plus loin l'importance de ces deux facteurs sur les caractéristiques mécaniques du sédi-

ment considéré, en particulier sur sa plasticité.

- La teneur en matière huniques peut être obtenue par perte de poids, exprimée en pourcentage du poids total, après traitement de l'échantillon à l'eau oxygénée à IIO volumes. La méthode n'est surtout valable qu'à titre qualitatif.

- La teneur en Carbonate de Calcium est obtenue par dosage à l'aide du calcimètre de BERNARD.
Le résultat est également exprimé en pourcentage du poids total.

- 8°) Plasticité

Celle-ci peut être définie comme la capacité d'un corps de changer de forme sous charge constante, sans changer de volume. Dans un sédiment argileux elle est provoquée par la présence d'une certaine quantité d'eau.

La présence de particules plates, influe directement sur cet état mais apparemment la cause véritable de la plasticité d'un sédiment est, non pas la nature ou la forme des éléments, mais l'eau interstitielle, solidifiée, fortement attractive.

Cette teneur en eau ayant une influence appréciable sur les propriétés, il était donc intéressant de définir les limites correspondant à des états particuliers de la matière, dus à des teneurs en eau déterminées; ces limites dites d'ATTERBERG du nom de leur créateur, constituent une méthode simple, particulièrement intéressante pour mettre en évidence certaines liaisons existant entre la géotechnique et la géologie.

Selon sa teneur en eau, un sol peut se trouver à trois états différents. Suivant les argiles, les teneurs en eau limite, qui séparent ces états varient suivant des fourchettes de valeurs très différentes.

On peut donc utiliser ces teneurs en eau qui marquent les

changements d'état pour identifier, classer, et comparer les différents sédiments argileux.

a) Limite de Plasticité Wp

C'est la limite inférieure de l'état plastique, au dessous de celle-ci les films d'eau entourant les grains n'ont plus les propriétés de l'eau libre, l'argile commence à s'émietter quand on la roule en fils de faible diamètre.

b) Limite de Liquidité Wl

C'est la limite supérieure de l'état plastique : pour une teneur en eau donnée, l'échantillon s'écoule comme un liquide sous son propre poids.

L'essai, très classique, se fait dans un appareil standardisé : la coupelle de CASAGRANDE.

On note la teneur en eau d'un échantillon trituré et placé dans une coupelle de façon à ce que les deux lèvres d'une saignée tracée dans la pâte, se rejoignent après vingt cinq coups secs donnés à la partie inférieure de la coupelle.

La limite s'exprime par une teneur en eau en pourcentage du poids sec.

Il existe d'autres limites, intéressant des cas bien particuliers : Limite d'adhérence, limite de retrait, limite d'absorption, limite de centrifugation, ces deux dernières ajoutées ultérieurement aux essais classiques d'ATTERBERG se rapportant aux phénomènes de rétention capillaire de l'eau contenue dans le sol.

c) Indice de Plasticité Ip

C'est l'expression du domaine entre les limites duquel le sédiment est dans l'état plastique.

Il est donné pour la relation

$$Ip = Wl - Wp$$

- 9°) Indice de Consistance Ce

C'est le rapport Ce = $\frac{Wl - We}{Ip}$

Si la teneur en eau d'un sol cohérent arrive au voisinage de la limite de Plasticité, la consistance ou état du sol augmente ainsi que son degré de compacité.

Degré de précision des mesures

Les analyses effectuées ont toujours été faites, de façon rigoureusement identiques (règlage des appareils, périodes d'humidification ou de repos).

Il est cependant inévitable, même si les essais sont réalisés par une même personne, qu'un facteur personnel intervienne

A propos de l'évaluation des limites d'ATTERBERG, on peut noter que le passage d'un état à un autre ne se produit pas brutalement, dès que la teneur en eau critique est atteinte. Il s'effectue progressivement dans un intervalle de teneurs en eau relativement large. Les critères de détermination des limites comportent donc une part d'arbitraire inévitable.

III - METHODE D'ECHANTILLONAGE

I°) Echantillons intacts et échantillons remaniés.

D'une manière générale, l'échantillonage doit se se faire aux endroits susceptibles de se trouver en dehors des zones de "mélanges" dues à des glissements anciens ou au lessivage des matières organiques vers la roche, pour ne citer que les plus fréquents.

C'est la première précaution à prendre, en principe la plus délicate. Les prélèvements sont de deux sortes : les prélèvements d'échantillons intacts et les prélèvements d'échantillons remaniés.

a) Le prélèvement d'échantillons intacts, non remaniés est effectué sous forme d'éprouvettes de sols, carottées au moyen d'outils simples : ce sont des carottiers coiffés d'une enclume permettant l'enfoncement par battage.

La carotte extraite est parafinée sur place pour être à l'abri de toute évaporation, susceptible de modifier sa teneur en eau naturelle.

Il faut noter cependant, que quelque soit le carottier utilisé, un certain remanienent est inévitable au voisinage des parois où une distorsion affecte les couches.

Les échantillons non remaniés permettent au laboratoire des mesures et essais concernant la teneur en eau naturelle, la densité humide, la résistance au cisaillement et les compressibilités simples, oedométriques et triaxiale.

b) Pour étudier la granulométrie, ou déterminer la teneur en calcium, le poids spécifique ou les limites d'Atterberg d'un sédiment, un échantillon remanié peut suffire. Par suite, l'extraction peut alors s'effectuer à la pelle, il suffira de s'entourer de toutes les précautions afférentes à l'échantillonage dans le cadre d'une telle étude.

2°) Méthode d'échantillonage

L'expérience a montré que les propriétés physiques de toutes les couches de sol naturel variaient considérablement suivant la verticale et dans une mesure peu négligeable, suivant les directions horizontales : un même banc d'argile est susceptible de variations fréquentes de la teneur en eau sur de courtes distances.

En fonction des fluctuations de l'état physique d'un même horizon, il est intéressant, quand cela est possible, d'effectuer des essais systématiques pour étudier un même banc sur toute son extension.

Cette méthode s'impose d'autant plus dans le sens vertical; l'idéal dans ce domaine serait de pouvoir étudier des carottages continus obtenus par battage.

3°) Choix du site de prélèvement.

Dans le cas le plus courant de l'échantillonage manuel, les sites les plus commodes et offrant le plus de garantie sont :

- Les carrières
- Les tranchées (adductions, assainissements, routes, voies ferrées).
- Les fouilles de terrassement.

Ces sites offrent bien souvent des coupes fraîches où la zone superficielle a été préalablement entamée.

Des précautions restent à prendre si l'on veut échantillonner dans des terrains en place et au prélèvement minimum.

a) Dans les coupes récentes, le prélèvement est effectué le plus près du fond, évitant ainsi au maximum la zone altérée.

b) Dans les tranchées déjà anciennes (routes, voies ferrées) et les carrières abandonnées, les prélèvements doivent au contraire éviter le fond du site où la zone de glissements superficiels et d'éboulements s'y trouve être à sa plus grande épaisseur. En outre, la surface de l'affleurement pourra être décapée sur une profondeur de 0,30 à 0,50 mètre .Quand cela est possible, l'échantillon sera pris de préférence sous un banc plus dur (calcaire, marne indurée) où l'altération superficielle sera moins avancée.

IV - NECESSITE D'UNE CLASSIFICATION DES SEDIMENTS EN VUE DE LEUR UTILISATION GEOTECHNIQUE

L'étude d'un sol de fondation se résume à deux stades. Il s'agit d'abord de déterminer l'influence respective des propriétés physiques des sols sur les propriétés mécaniques. Ce problème résolu, on passe à un deuxième stade : le problème du tassement et de la stabilité de ce sol, chapître qui sort quelque peu du cadre de notre étude par son caractère purement mécanique.

Le seul énoncé des propriétés phy iques et chimiques montre, si besoin en était, l'importance du travail d'identification a effectuer quand on aborde un sol.

Les propriétés de résistance d'un sol ne peuvent être définiesque par l'ensemble de ses caractéristiques. L'étude d'une fraction de celles-ci sont susceptibles d'amener des erreurs regrettables.

Dans la plupart des cas, pour les commodités de l'expérimentation, on est amené a substituer de nouvelles caractéristiques aux premières. C'est dans une telle optique que sont employées, par exemple, les limites d'Atterberg.

De tels paramètres semi-empiriques ne se justifient que parce qu'ils expriment quelque chose du point de vue pratique et que les renseignements qu'ils fournissent permettent de se faire une idée sur les possibilités de déformation et de l'importance de la consolidation du sol.

En fait, une identification géotechnique se ramène essentiellement à classer le sol considéré.

A l'échelle de la fondation, une classiffication géologique serait nettement insuffisante, car s'il est toujours intéressant et recommandé de connaître l'âge géologique d'un sol, sa description macroscopique et même microscopique n'apporte que des renseignements incomplets sur ses possibilités en tant que sol de fondation.

A - CLASSIFICATION DES SEDIMENTS ARGILEUX JURASSIQUES BASEE SUR LA GRANULOMETRIE.

Dans l'énumération des facteurs influençant les caractéristiques physiques d'un sédiment, nous avons vu quelle importance la granulométrie avait en ce domaine.

I°) Choix des fractions granulonètriques.

La première difficulté consiste a faire un choix des limites des fractions, et de la terminologie à donner à celles-ci.

Nous avons adopté la classification d'ATTERBERG qui paraît être une des plus logiques et, en tout cas, des plus simples.

Le choix des limites séparant le sable fin, de la fraction silteuse, et celle-ci de l'argile, est très délicat. Dans la classification adoptée, les silts ont une limite supérieure de 0,02 mm., dimension au-delà de laquelle, un limon humide voit ses grains ne plus posséder de pouvoir agglomérant et perd sa plasticité.

La limite supérieure des minéraux argileux a été fixée à 0,002 mm. M.NIGGLI, admet que les minéraux argileux apparaissent à 0,02 mm. et sont abondants à partir de 0,002 mm. le quartz et la calcite existent encore dans l'ultime fraction observable au microscope (0,5 à 3 microns).

2°) Technique de l'analyse granulométrique.

La composition granulométrique caractérise les dimensions relatives des éléments qui constituent le sédiment. On l'obtient au moyen d'une série de tamis de la série A.F.N.O.R., dont les dimensions sont de 10 - 5 - 2 - 1-05 - 0,2 et 0,1 mm. Le tamisage est humide.

3°) Sédimentométrie : Principe de la méthode

Sur les particules inférieures à 0,1 mm. en majorité dans nos marnes, on procède par lévigation.

On sait que la vitesse de chute des corps solides en suspension dans un liquide est d'autant plus rapide que le volume du solide est grand. La formule de Stockes qui est basée sur ce phénomène donne la vitesse de chute des corps sphériques en fonction de leur diamètre.

$$v = \frac{2}{9} \left(\frac{g - e}{} \right) \left(\frac{d}{2} \right) 2$$

ou g = poids spécifique des grains sphériques

e = densité de l'eau

= viscosité de l' au

d = diamètre des grains

On peut donc par l'application de cette formule déterminer à chaque instant le diamètre des grains déjà déposés, ce qui a le mérite d'éviter le fractionnement du sédiment à étudier, en classes dimensionnelles aux limites arbitraires. Nous avons employé le densimètre de BOUYOUCOS : c'est un flotteur qu'on immerge complètement et qui accompagne la zone de la suspension ayant même densité que lui.

Soit h, la profondeur d'équilibre du densimètre au temps t.

Toutes les particules dont la vitesse de chute est plus grande que celle qui est définie par h = vt, sont dans la zone supérieure du densimètre, et cela depuis le début de la sédimentation.

Donc aucun grain plus gros que ceux dont la vitesse est définie par h = vt, ne pourra s'être déposé sur le densimètre et en avoir modifié le poids spécifique quant aux grains dont la vitesse de chute est inférieure à celle qui est définie par h = vt,

ils sont moins rapides dans leur descente que le densimètre lui-même, et par conséquent, ne peuvent pas non plus surcharger le densimètre.

Le densimètre subit une poussée, dont il faut tenir compte dans l'interprétation des lectures.

Cette poussée est égale au poids de la suspension déplacée et appliquée au centre de gravité du volume déplacé.

La densité lue indique par conséquent la valeur moyenne de la densité dans la tranche correspondant à la solution déplacée dans la colonne de sédimentation. Puisque cette densité augmente progressivement vers le bas, on conçoit qu'il existe un plan dans la tranche correspondant au flotteur, où les densités sont exactement celles qui sont indiquées par le densimètre. Ce plan de densité moyenne est encore appelé "plan de profondeur effective".

Il a été déterminé dans le présent travail par l'application de la formule de Cassagrande selon laquelle :

$$\text{La profondeur effective } H = \frac{h_I + h_2}{2} - \frac{V}{2S}$$

ou h_I = profondeur de summersion au sommet du flotteur

h_2 = profondeur de summersion à la base du flotteur

V = volume du flotteur

S = surface de la section de l'éprouvette.

Par ailleurs, comme les grains qui composent les sédiments ont une forme qui diffère notablement de celle de la sphère, les diamètres déterminés par cette méthode n'ont qu'une valeur relative et sont dits "équivalents".

Les "diamètres équivalents" des particules ayant atteint au moins la profondeur effective, ont été déterminés à l'aide d'un nomogramme dérivé de ceux établis par E.M. CROWTHER.

Le pourcentage W de ces particules, dans un volume de suspension ajusté à un litre, a été obtenu à l'aide de la formule :

$$W\,X = \frac{g}{g -} \quad \frac{100}{P} \quad (r - \quad) \; 10^{3} + m$$

ou g = poids spécifique du sédiment

= densité du liquide dispersant à la température de 20°

P = le poids de l'échantillon à sèc

r = la lecture densimètrique

m = la correction due au ménisque et à la température.

4°) Expression de l'analyse granulométrique

Les résultats ont été exprimés en cumulation rétrograde, établis sur une courbe granulométrique en coordonnées semi-logarithmiques, moyen d'expression le plus largement répandu dans les laboratoires.

La courbe granulométrique cumulative étant l'intégrale de la courbe de fréquence, il sera éventuellement facile d'obtenir cette dernière, à partir de la courbe cumulative, par un procédé graphique classique (cf. RIVIERE 1952)

5°) Résultats

a) Charnouthien

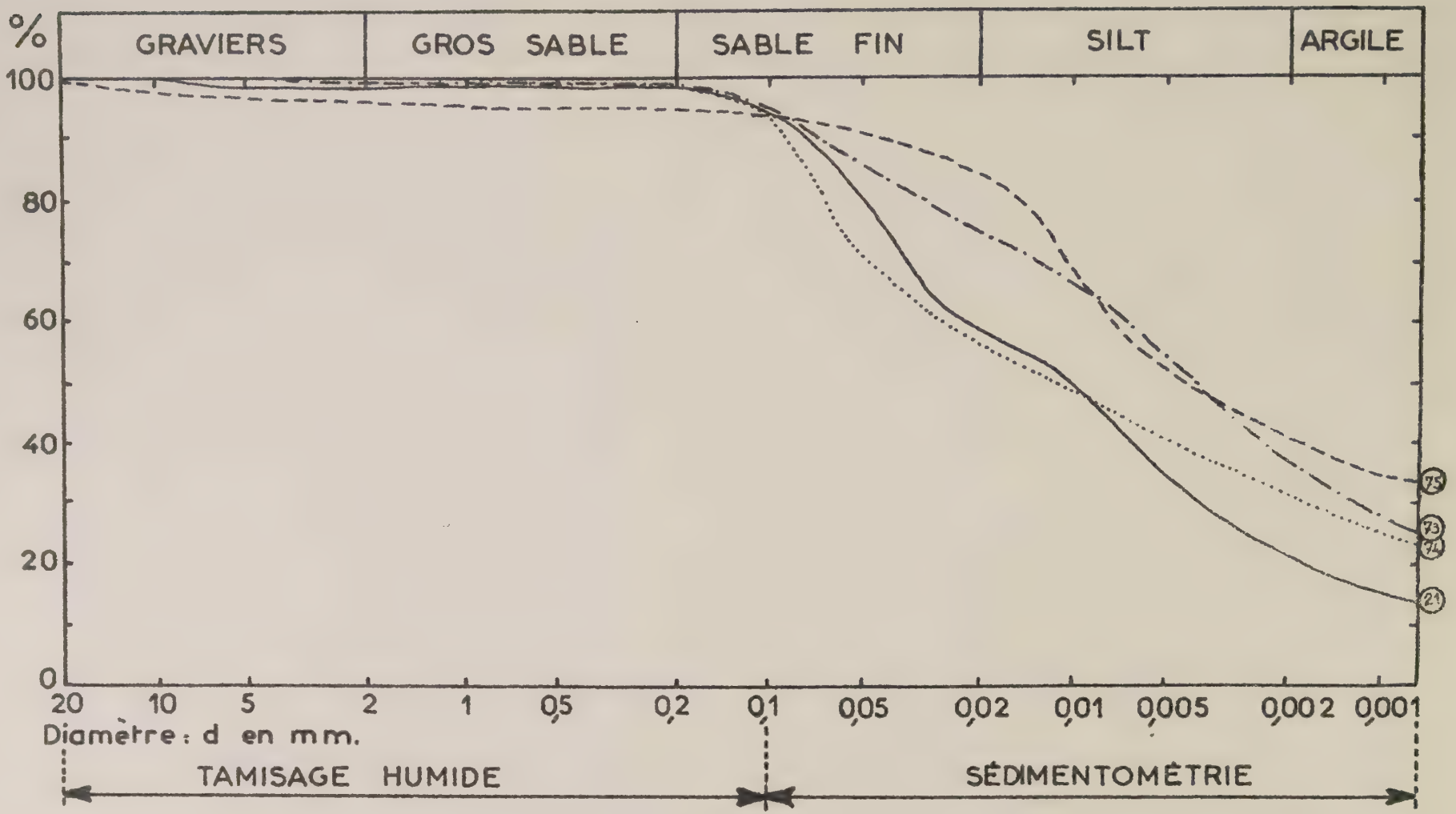
Cinq échantillons types ont été choisis. Il sont sensés représenter l'ensemble des échantillons du Charnouthien que nous avions analysés.

Echantillon 21, prélevé à Pugey; c'est un shale marneux gris, siliceux et très micacé. La fraction carbonatée (17%) est assez importante pour un sédiment charnouthien (zone des marnes à riches).

Les quatres échantillons suivants proviennent d'une tranchée creusée au-dessus de Morre.

Echantillon 73, marne grèseuse, gris-jaunâtre avec quelques trainées bleuâtres, siltouse et micacée, très compacte.

-- ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES --.



21 : Shale marneux gréseux gris _ Pugey.
73 : Marne gréseuse grise-jaunâtre _ Morre.

CHARMOUTHIEN

74 : Shale marneux gréseux compacte gris-jaunâtre _ Morre.
75 : Marne barriolée _ Morre.

Pl. II

Echantillon 74; shale marneux, grèseux, gris jaunâtre, silteux et micacé, très compact. Cet échantillon à une très importante fraction carbonaté (I9%).

Echantillon 75, marne barriolée, ocre et bleue, cette dernière couleur nettant en évidence des passages plus consistants. De nombreux pisolithes calcaires la parsèment.

La marne décrite ci-dessus, est un échantillon typiquement altéré sur place par processus chimique.

Echantillon 76, marne gris bleutée, plastique, quelques veines jaunâtres dénotent une très légère altération. Cette dernière marne a une position stratigraphique discutée.

Dépouillement des résultats.

D'ores et déjà, on peut noter que les échantillons les plus silteux : 2I, 74, ont les pentes des courbes les moins fortes et les moins régulières.

Les fractions : sable fin et silt prédominent nettement et semblent relativement uniformes au contraire de l'amorçage de la fraction argileuse.

Le diamètre moyen des particules (D.50) est respectivement pour ces deux échantillons de 0,0II mm. et 0,0I2 mm.

L'échantillon 73 a sa granulométrie influencée par l'attaque de certains agrégats consécutive à un début de remaniement chimique; et bien qu'on ait affaire à une marne gréseuse, la courbe révèle une fraction fine plus importante que précédemment.

En effet, l'altération chimique provoque d'importants remaniements dans le matériau comme en témoigne l'échantillon 75, qui a des caractères très spéciaux : état plastique dû à une humidité très soutenue, teintes barriolées, consistance plus faible.

Le D. 50 de ces deux marnes est de 0,004I mm. et 0,0042 mm.

L'échantillon 76 forme une classe à part; d'une teneur en eau assez voisine de l'état plastique, sa courbe est uniforme et la fraction silteuse couvre la majeure partie de la courbe représentant l'échantillon.

Le diamètre moyen des particules s'est même abaissé D.50 = 0,002 mm. Cet échantillon bien qu'étudié dans le Charmouthien, est susceptible de provenir d'un glissement englobant des marnes du Lias supérieur, aucun argument paléontologique n'étant venu confirmer ou infirmer cette hypothèse. L'analyse micropaléontologique (voir page 29) a révélé une micro-faune appartenant au Lias supérieur. La courbe granulométrique semble le confirmer.

Conclusion

On constate que l'analyse granulométrique donne des résultats valables.

On a pu aussi mettre en valeur, deux catégories de courbes.

I°) La première intéresse les domaines finement sableux et silteux; ce sont des marnes gréseuses, micacées.

2°) La deuxième met en évidence un domaine silteux largement développé; ce sont des marnes gréseuses à commencement d'altération ou des marnes franchement altérées.

Une troisième catégorie représentée par l'échantillon 76; un matériau donnant une courbe granulométrique uniforme et où le domaine très fin (silt fin, argile) est important; celle-ci ne serait finalement que l'expression d'un individu du Lias supérieur.

b) Lias supérieur

Nous avons procédé de la même façon que pour le Charmouthien et extrait 6 échantillons typiques.

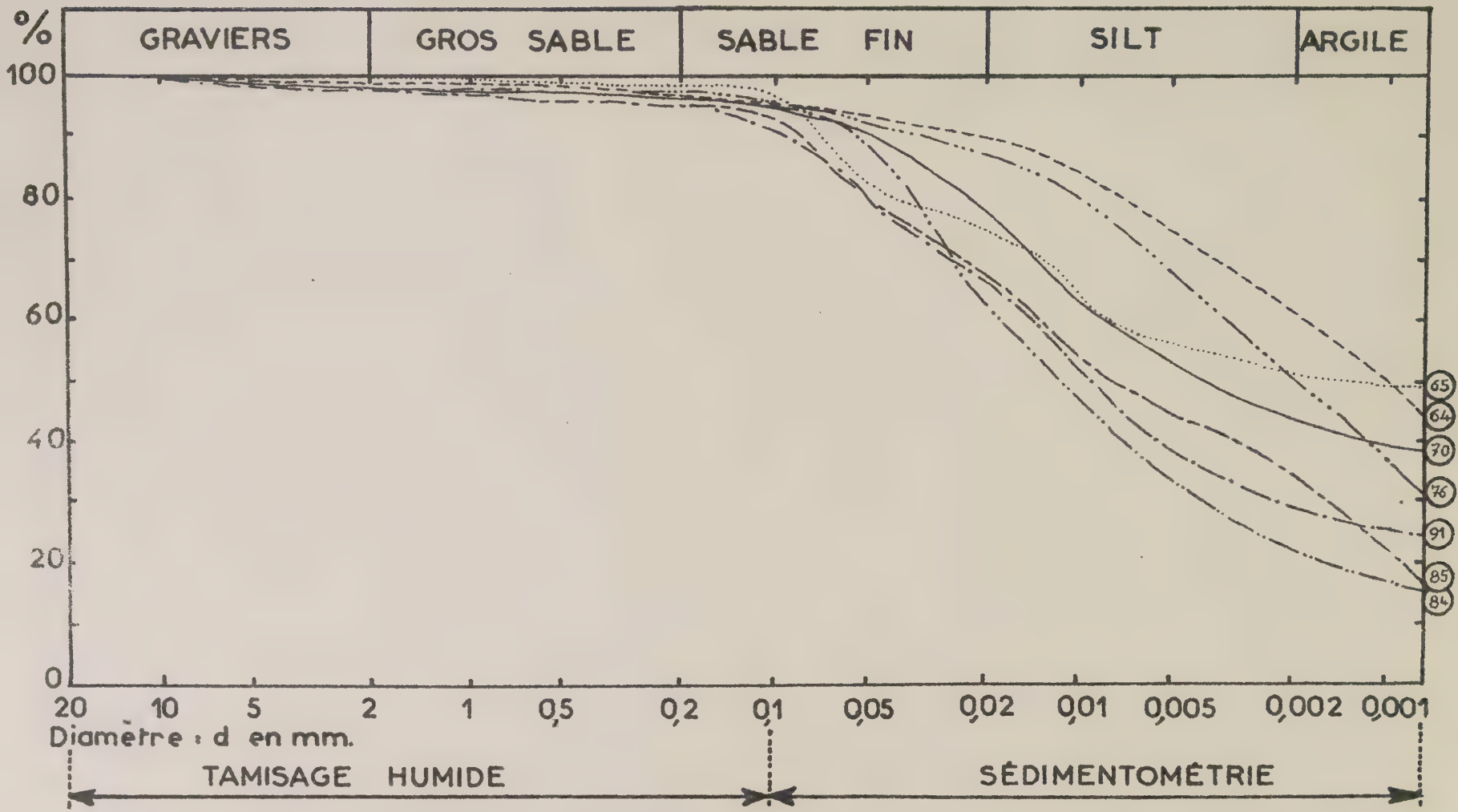
Les échantillons 84 et 85 ont été prélevés dans la marnière d'Ecole.

L'échantillon 84, est une marne constituée de très fines alternances de lits noirâtre et de lits gréseux gris-jaunâtres, silteux, très micacés. Ces lits sont épais de un ou deux centimètres. Des plaquettes franchement gréseuses sont parfois intercalées.

L'échantillon 85, est un shale marneux, grisâtre, gréseux, micacé très compact.

L'échantillon 9I a été recueilli dans l'ancienne Tuilerie d'Ecole. C'est une marne compacte gréseuse gris-jaunâtre, micacée.

ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES



TOARCIEN.

64 : Marne barriolée _ Morre.
65 : Argilite rouille _ Morre.
70 : Argilite finement litée, brune _ Valentin.

_ AALÉNIEN

76 : Marne grise-bleutée _ Morre.
84 : Marne en fines alternances _ École.
85 : Marne micacée grise-jaunâtre _ Marnière d'École.
91 : Marne micacée compacte grise-jaunâtre _ Ancienne marnière d'École.

Pl. III

L'échantillon 70 a été recueilli dans les travaux de fondation d'une scierie près du lieu dit "Au Têtes", au Nord de Valentin. C'est un shale marneux gris-jaunâtre, micacé, très finement lité. Les lits sont séparés les uns des autres par une argile brun-noirâtre, le tout noyant de rares nodules calcaires.

Les échantillons 64 et 65 ont été prélevés dans une tranchée au Nord du cimetière de Morre.

L'échantillon 64 est une marne plastique barriolée brunâtre à grisâtre.

L'échantillon 65 est une argilite rouille, silteuse, assez plastique.

Ces deux derniers échantillons ont subi une profonde altération, le second en particulier qui présente les caractères d'une épigénisation quasi totale.

Dépouillement des résultats.

Les échantillons 84, 85, et 9I ont des pentes assez uniformes intéressant les fractions sable fin et silt. Le diamètre équivalent moyen D.50 est très voisin pour ces trois marnes; respectivement : 0,0I2 - 0,0082 et 0,009I mm.

Les échantillons 70 et 65 dénotent une certaine parenté. La fraction silteuse grossière est dominante, l'échantillon 64 qui dénonce un début de remaniement important semble équilibrer une fraction sableuse plus importante par une plus grande teneur en argile. Leur D.50 est de 0,0035 m.m. et 0,00I5 mm.

L'échantillon 64 est celui qui à la fraction fine la plus importante.

Conclusion

On peut remarquer la notable identité qu'il y a là, avec les marnes du Charmouthien. Les deux étages voient leurs échantillons types se classer dans trois types :

I°) Les échantillons 84, 85, 9I, correspondent aux marnes gréseuses 2I et 74 du Charmouthien. Ce sont des matériaux formés d'agrégats gréseux et très micacés, sauf pour le 2I.

2°) Les échantillons 70 et 64 correspondent aux échantillons 73 et 75. On remarque encore des agrégats gréseux, le mica est moins abondant, mais la courbe révèle une fraction argileuse importante, plus importante que ce qu'elle était pour les marnes du Charmouthien, dans la deuxième classe; ce sont donc des matériaux intermédiaires.

3°) L'échantillon 64 se rapproche par sa courbe très régulière de l'échantillon 76. Les grains sont plus roulés, usés; on note d'importants nodules de fer, très peu de micas, une riche microfaune.

c) Jurassique supérieur

Les marnes de l'Oxfordien sont représentées par deux types d'échantillons.

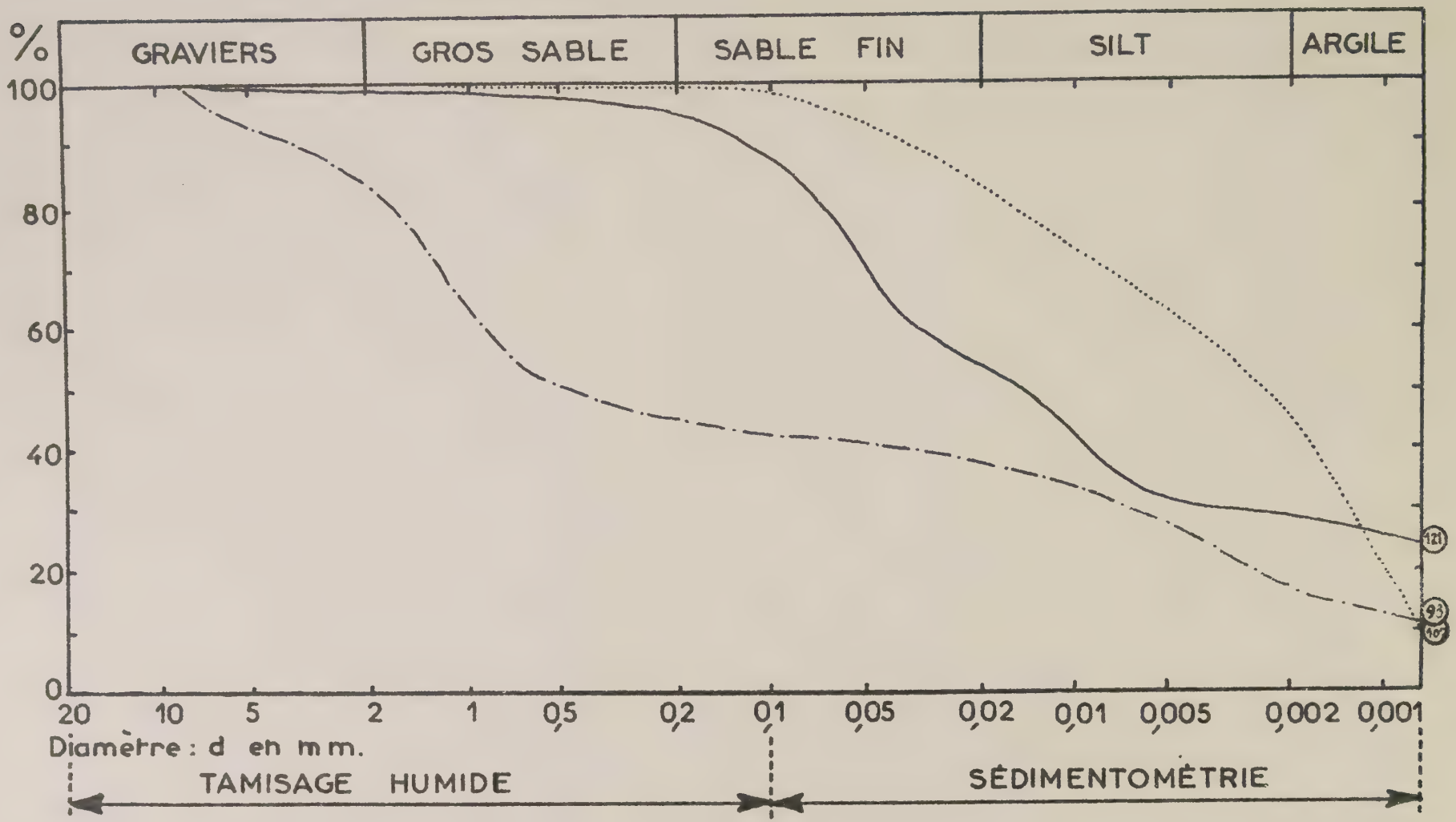
L'échantillon 121 provient d'un sondage effectué sur le tracé du canal de la Citadelle (S.10) à la profondeur de 8,80 mètres. C'est une marne grise, compacte. A la loupe binoculaire il présente un aspect très uniforme donné par des agrégats gréseux, gris très homogènes. On note des nodules cylindriques pyriteux, de rares minéraux, très peu de mica. La teneur en $Co_3 Ca$ est importante, qui constitue 41 % de l'échantillon. La courbe représentative est complexe.

L'échantillon 93 est une marne remaniée, prélevée dans l'ancienne marnière du Vernois, la granulométrie plus fine démontre que les agrégats se sont dissociés sous les actions chimiques et mécaniques. Ceux-ci sont donc plus rares, et de nombreux Quartz roulés et des cristaux de gypse font leur apparition. La couleur générale tire sur le rouille. Le sol paraît avoir été "reclassé" et la courbe de fréquence est beaucoup plus normale. Le D.50 est de 0,0025mm.

Il est évident qu'entre ces deux types de courbes, on rencontre toute une série de courbes intermédiaires.

Quelque peu à part, on a choisi une marne très fortement calcaire (85%) du Kimméridgien; sondage S.6 (Canal de la Citadelle), profondeur 10,50 mètres. Marne crayeuse à taches brunes avec de nombreux débris d'Exogyres et des petits cailloux, soit de calcaire compact, soit de marnes noirâtres. Les fractions les plus

.- ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES -.



JURASSIQUE

SUPÉRIEUR

93 : Shale marneux barriolé — Marnière du Vernois.

107 : Marne beige - Trois Châtels.

121 : Marne grise compacte — Velotte.

Pl. IV

importantes sont celles des graviers et des sables grossiers; les éléments ne sont pas disposés selon la même loi d'uniformité. D.50 = 0,45 mm.

6°) Conclusions générales concernant la granulométrie des marnes jurassiques.

a) On peut effectuer une ébauche de classification des matériaux en vue de leur application géotechnique. On a vu qu'ici, on distinguait, en gros, trois catégories pour ces sédiments, classification apparemment nette pour les argilites et marnes du Lias, bien que les particules de I0 à 50 microns constituent cependant près de la moitié du % des éléments, dans pratiquement tous les cas.

D'autres remarques s'imposent.

b) La plupart des courbes obtenues sont de type complexe. L'absence de classement marquée par la granulométrie correspond à des sédiments dont la formation résulte d'un déséquilibre entre la charge transportée par le milieu marin et la compétence résultant de sa turbulence, (mer agitée, courants marins). La sédimentation n'a pu se faire par un mécanisme statistique d'échange.

Ce fait a pu être aggravé par des perturbations dues aux apports éoliens, par les variations climatiques du continent voisin ayant influencé les apports terrigènes.

Ces observations corroborent le dépouillement des préparations microscopiques.

c) L'altération d'un sédiment, semble dissocier les agrégats et "reclasser" la granulométrie du matériau. L'allure de la courbe devient dans tous les cas beaucoup plus régulière : on observe une légère concavité vers le bas.

d) Dans un autre domaine, si l'on compare l'amorce de terminaison des courbes des échantillons 75 et 76 pour le Charmouthien, 64 et 65 pour le Lias supérieur ou également 93 et I2I pour l'Oxfordien. La phase argileuse des marnes riches en éléments grossiers et notamment en éléments sableux, parait toujours plus riche en éléments ultra fins que la fraction argileuse correspondante des échantillons de granulométrie générale plus fine, ce qui apporterait un argument à la théorie de RIVIERE (I95I), concernant une sédimentation sélective par des phénomènes purement mécaniques (voir page 48).

Dans l'état de ce travail, aucune relation ne peut être établie entre ce fait et les problèmes de sédimentation soulevés par ces interprétations granulométriques. En effet, ces variations de pourcentage de la fraction argileuse ne semblent affecter que les échantillons franchement remaniés par rapport aux autres.

7°) Critique d'une Classification basée uniquement sur la granulométrie.

On a vu que la granulométrie d'un sédiment développait une ébauche de classification et donnait des renseignements intéressants sur la sédimentation.

Un certain nombre d'inconvénients persistent :

a) Une première restriction à la méthode vient du fait que l'analyse sédimentométrique concernant les particules inférieures à 0,1 mm. sont basées sur la loi de Stockes, et assimile les particules à des sphères. Or, les grains ne sont jamais tout à fait sphériques et ce, dans les cas les plus favorables ; si les agrégats constatés peuvent encore être compris comme des sphères, il ne saurait en être de même pour les particules micacées, qui nous l'avons vu, constituent la majeure partie des fractions silteuses et argileuses.

Ces particules ont un comportement hydraulique tout à fait spécial. L'étude des modalités de descente de micas nous montre qu'elles offrent une très grande variété de types : il a été observé des descentes hélicoïdales, des descentes verticales complexes, verticales simples et des descentes obliques (BERTHOIS 1961).

Ainsi le calcul du diamètre nominal, qui assimile le grain à une sphère, s'écarte considérablement de la réalité et il en résulte que la vitesse de chute est très différente de celle supposée et par suite, les indications numériques portées sur le diagramme sont des chiffres fictifs.

b) Le choix des limites des différentes fractions reste arbitraire

c) La classification basée sur l'analyse granulométrique est discontinue. Elle ne peut ranger les grains par ordre de diamètre individuel, mais seulement par catégorie comprise entre certaines limites, quelque soit d'ailleurs, le mode de représentation adoptée.

La courbe granulométrique donne l'apparence sensible du matériau et des indications générales sur ses propriétés, mais elle ne suffit pas à préciser les propriétés mécaniques. Celles-ci dépendent, en particulier pour les marnes, d'autres facteurs qui sont la composition chimique ou minéralogique et la structure, soit la répartition spatiale des grains, leur forme, leur position réciproque, la dimension, la répartition des vides, enfin la teneur en eau.

La définition géotechnique de l'argile doit être la même que sa définition minéralogique; le caractère granulométrique ne joue donc pas un rôle prépondérant.

Une classification basée sur l'examen des courbes granulométriques implique une dénomination précise des matériaux selon leurs seuls critères granulométriques : Ce qui peut donner lieu à des résultats inattendus. Ainsi l'échantillon 75 étant composé de près de 20% de sables, plus de 40% d'éléments silteux et 40% d'argile pourrait être dénommé "Limon argileux"; lorsqu'au point de vue géotechnique, il a les propriétés d'une argile.

Conclusion

De la discussion qui précède, il ressort que la classification des marnes, basée sur la granulométrie, reste nettement insuffisante du fait que leurs propriétés dépendent en outre de la composition chimique et minéralogique, aucune relation n'existant à priori entre granulométrie et composition chimique.

B - CLASSIFICATION BASEE SUR LA PLASTICITE

I°) Généralités.

La courbe granulométrique n'a trait qu'aux diamètres des grains. De fait, si au dessous de 2 microns, les particules envisagées sont en général des minéraux argileux, il n'en est pas de même au dessus de cette dimension. Il en résulte que pour une même granulométrie, les propriétés physico-chimiques et par suite mécaniques peuvent différer complètement.

Il est nécessaire de compléter ainsi l'étude granulométrique par un essai simple tenant compte à la fois de la géométrie et de la composition chimique des particules. Un tel essai

revient à déterminer les limites d'ATTERBERG. Nous avons donné précédemment les définitions de ces limites, qu'il nous suffise de rappeler que :

a) La limite de liquidité correspond dans la nature à l'état des argiles sédimentaires de formation récente reposant dans le fond des lacs et des mers, ou des argiles en couches minces ou lenticulaires, au contact d'une nappe d'eau souterraine. Elle indique une teneur en eau telle que les films d'eau entourant les particules ont une épaisseur suffisante pour annuler le frottement de ces particules les unes sur les autres, tout en maintenant une certaine cohésion, de telle manière que le corps ne se comporte pas comme un liquide indéfiniment déformable.

b) La limite de plasticité correspond à l'état des sédiments argileux situés à deux ou trois mètres de profondeur, en climat tempéré. Elle représente l'épaisseur minima des films d'eau au-dessus de laquelle ceux-ci jouent un rôle de lubrifiant et favorisent les déplacements des points de contacts.

L'intervalle entre ces deux limites définit la zone de plasticité pour laquelle le sol conserve une certaine cohésion, mais peut subir sous de faibles charges de fortes déformations à volume constant. L'étendue de cette zone, définie par la différence WL - WP, est représentée par le symbole IP.

2°) Expression des résultats dans l'étude des sédiments marins jurassiques de la Région bisontine.

Les résultats des essais physiques groupés dans les tableaux ci-joints, nous montrent que ceux-ci donnent des chiffres très comparables pour l'ensemble des échantillons.

En effet, connaissant sensiblement la nature minéralogique de la fraction argileuse de ces sédiments marins jurassiques (on a supposé au préalable que nous avions surtout affaire à des Illites), la dispersion des propriétés physiques et mécaniques de ces marnes ne dépendent plus de la nature minéralogique de la fraction argileuse, mais de sa fréquence, relativement aux carbonates et aux éléments détritiques, la nature chimique du sédiment n'intervenant alors qu'en fonction de la teneur en carbonates et de son degré de remaniement éventuel.

o O o

TABLEAU DE RESULTATS DES

Lieu de Prélèvement	Réf.	Description sommaire de l'échantillon	We	CO_3Ca
Les Mercureaux	5	Shale marneux gris compact		I2
Sous Chatillon-le-Duc	9	Argilite noire organique		0,5
Pugey Tranchee d'assainissement.	2I	Shale marneux, silteux, gris micacé.		I7
	22	Argilite silteuse, brunâtre légèrement bariolée	I0	3,5
	23	Argilite brune		0,5
	26	Marne brunâtre légèrement bariolée		I3,5
	27	Argilite bariolée; jaunâtre à bleu-gris, à débris organiques	I4	0,5
	28	Marne bariolée gris-jaunâtre à bleue, à nodules calcaires	20	7
Arguel - cote 40 Fondation	29	Argilite bariolée; rouille à bleue à nodules calcaires et limonite.	I8	I
La Chapelle des Buis. Talus de route	39	Shale marneux gris-brunâtre		9,5
	40	Marne jaunâtre micacée alternant avec des lits blanchâtres.		30

ANALYSES POUR LE CHARMOUTIEN

Wl	Wp	Ip	γh	γs	γg	n	e	$\frac{d}{d_{50}}$
37	23	I4						
5I	3I	20						
33	I9	I4			2,66			0,0I
46	24	22	2,II	I,9I		0,27	0,36	
5I	25	26						
46	25	2I	2,I3					
5I	27	24	2,I7	I,92		0,28	0,38	
48	27	2I	2,08	I,73		0,34	0,5I	
47	2I	26	2,04	I,72		0,I5	0,I7	
50	26	24						
35	I9	I6						

(SUITE)

Lieu de Prélèvement	Réf.	Description sommaire de l'échantillon	We	CO_3Ca
La Chapelle Des Buis	4I	Shale marneux gris-jaunâtre		29
	42	Shale marneux brun-jaunâtre		9
	43	Shale marneux gris-bleuté		8
	44	Marne bariolée : jaune à bleue		20
Morre R.N.67	50	Shale marneux silteux gris, induré		2I
	56	Marne silteuse brun-jaunâtre		2I
	57	Shale marneux micacé brun-grisâtre		I2
Morre Tranchée d'assainissement	6I	Argilite bariolée : brun rougeâtre à bleu, à débris organiques (corrosive)	2I	2
	75	Marne bariolée : ocre à bleu, à nodules calcaires	20	7
	74	Shale marneux silteux et micacé gris-jaunâtre	2I	I9

(SUITE)

Wl	Wp	Ip	γ_h	γ_s	γ_g	n	e	$\frac{d}{D}_{50}$
47	23	24						
49	24	25						
4I	23	I8						
48	23	25						
37	25	I2						
37	2I	I6						
43	23	20						
44	24	20	2,04	I,69		0,36	0,56	
49	27	22	2,03	I,69	2,58	0,30	0,42	0,004
38	2I	I7	2,I6	I,78	2,65	0,32	0,47	0,0I2

(SUITE)

Lieu de Prélèvement	Ref.	Description sommaire de l'échantillon	Wc	Co_3Ca
Morre Tranchée d'assainissement	73	Marne silteuse et micacée gris-jaunâtre à filets bleuâtres, compacts.		9
	59	Argilite verdâtre (corrosive)	I4	3
	58	Shale marneux grisâtre compact		9,5
	60	Argilite silteuse brun-grisâtre finement litée à débris organiques.	I7	2,5
	77	Shale marneux silteux gris		8,5
	76	Marne gris-bleutée à jaunâtre	20	9,5

TABLEAU DES RESULTAT DES

Les Grands Prés-Nord de Pugey	20	Argilite noire plastique		3,5
	47	Marne noire plastique à cailloux calcaires et plaquettes noires	I9	6,5
Le Grand Treuchot R.D. III	I4I	Argilite jaunâtre		3

(SUITE)

Wl	Wp	Ip	γ_h	γ_s	γ_g	n	e	$\frac{d}{\sqrt{n}}50$
48	22	26			2,55			
5I	26	25	2,II	I,85				
4I	23	I8						
46	26	20	2,I5	I,83				
4I	23	I8						
58	27	3I	2,II	I,75		0,I6	0,I9	0,0035

ANALYSES POUR LE TOARCIEN

54	27	27						
5I	24	27	2,07	I,73		0,34	0,5I	

(SUITE)

Lieu de Prélèvement	Ref.	Description sommaire de l'échantillon	We	CO_3Ca
Trou au loup R.N.67	48	Marne gris-ardoise à taches rouilles		27
	49	Shale marneux à alternances grises et brunes		9,5
Morre tranchée d'assainissement	66	Marne noire plastique	I3	8
	67	Marne bariolée : brunâtre à rougeâtre, plastique à nodules calcaires	I0	6
Ecole Ancienne marnière	89	Argilite silteuse gris-jaunâtre		5
	90	Shale marneux, silteux et micacé gris-jaunâtre		6
	9I	Marne silteuse et micacée gris-jaunâtre, compacte	II	I0
Pic St Loup (Hérault)	I3I	Marne schisteuse noire		

TABLEAU DES RESULTATS DES

Les Clairons	I9	Shale silteux et micacé gris-ardoise alternant avec des lits gréseux		8

(SUITE)

Wl	Wp	Ip	χh	χn	χc	n	e	$\frac{d}{D_{50}}$
48	23	25						
57	28	29						
5I	26	25	2,I9	I,93		0,I5	0,I7	
47	23	24	I,54	I,40		0,47	0,8(	
48	26	22	2,24					
44	23	2I	2,26	2,09		0,20	0,25	
35	20	I5	2,I4	I,92	2,38	0,I8	0,2I	0,009
22	I5	7						

ANALYSES POUR L'AALENIEN

34	20	I4						

(SUITE)

Lieu de Prélèvement	Ref.	Description sommaire de l'échantillon	We	CO_3 Ca
Le Grand Treuchot D. III	30a	Argilite silteuse et micacée, rouille		0,5
	30	Marne gris-foncé		6,5
	31	Shale marneux micacé, brun à intercalations gréseuses		6
	32	Marne micacée grise, à intercalations gréseuses		8
	33	Argilite silteuse rouille à nodules calcaires		0,5
	34	Shale marneux micacé gris à débris organiques		II
	35	Shale marneux gris-jaunâtre		8
	36	Shale concoïdal marneux, micacé gris-bleu, compact		7
	37	Argilite terreuse à débris organiques et nodules calcaires		4,5
	38	Marne concoïdale, gris-foncé, compacte		6,5

(SUITE)

Wl	Wp	Ip	γ_h	γ_s	γ_g	n	e	$\frac{d}{m}_{50}$
4I	22	I9						
40	20	20						
38	20	I8						
39	20	I9						
57	29	28						
5I	24	27						
49	26	23						
39	2I	I8						
44	2I	23						
52	26	26						

(SUITE)

Lieu de Prélèvement	Réf.	Description sommaire de l'échantillon	Wo	CO_3 Ca
Morre Fondations	45	Shale marneux silteux et micacé, gris-bleu, finement lité	I2	6,5
	46	Marne micacée gris-ardoise	I2	8,5
Valentin Scierie Fondations	68	Marne silteuse micacée, gris-jaunâtre, alternant avec de minces lits gréseux	I7	8
	69	Shale argileux micacé, finement lité, à débris organiques	I8	4
	70	Argilite brune micacée, finement litée alternant avec des lits oxydés rouilles	I4	3,5
	7I	Argilite silteuse, micacée, rouille, à nodules calcaires		0,5
Ecole Tuilerie	84	Fines alternances d'une marne micacée noire, avec des lits oxydés jaunâtres à nodules plats gréseux	I2	6,5
	85	Shale marneux silteux micacé, gris jaunâtre	I3	8
	86	Shale marneux silteux, micacé, gris jaunâtre finement lité, alternant avec des lits gréseux	I5	9
	87	Marne silteuse, micacée rouille, compacte à intercalations gréseuses		I2
	88	Argilite silteuse micacée grise à taches rouilles		4,5

(SUITE)

Wl	Wp	Ip	γh	γs	$\gamma \varepsilon$	n	c	$\frac{c}{\sqrt{n}}$ 50
43	23	20	2,I0	I,87		0,29	0,40	
37	I9	I8	2,20	I,96		0,25	0,33	
42	2I	2I	2,I8	I,86		0,29	0,40	
47	2I	26	2,4I	2,04		0,22	0,28	
43	23	20	2,25	I,97	2,54	0,II	0,I2	0,004
46	26	20						
38	2I	I7	2,22	I,98		0,25	0,33	
43	2I	22	2,32	2,05	2,57	0,20	0,25	0,008
43	2I	22	2,22	I,93		0,26	0,35	
39	20	I9	2,I3					
46	2I	25						

(SUITE)

Lieu de Prélèvement	Ref.	Description sommaire de l'échantillon	We	CO_3 Ca
Ecole Tuilerie	92	Shale marneux micacé rouille, alternant avec de fins lits grés	I2	I0,5
Lantenne Vertière Tuilerie	04	Shale marneux gris-bleu	I2	8,5
	05	Marne bariolée : gris à jaunâtre		9
	06	Marne silteuse bariolée : gris à jaunâtre	28	8,5

TABLEAU DES RESULTATS DES

Morre Tranchée d'Assainissement	65	Argilite silteuse rougeâtre	24	I
	64	Marne bariolée : brunâtre à grisâtre	2I	I0,5
	63	Argilite silteuse rouille, à cailloux calcaires	23	0,5
	62	Marne brun noirâtre veinée rouille à pisolithes calcaires	22	7

(SUITE)

Wl	Wp	Ip	γ_h	γ_s	γ_d	n	e	$\frac{d_{50}}{mm}$
4I	I9	2I	2,26	2,0I		0,23	0,29	
38	22	I6	2,5I	2,24		0,I5	0,I7	
43	24	I9						
43	36	I7	2,I8	I,70		0,35	0,53	
ANALYSES POUR LE TOARCIEN/AALENIEN								
63	26	37	2,04	I,64	2,66	0,37	0,58	0,00I5
56	25	3I	2,II	I,74	2,34	0,25	0,33	0,00I
60	26	34	I;99	D,6I		0,38	0,90	
5I	25	26	2,03	I,66		0,37	0,58	

TABLEAU DES RESULTATS DES

Lieu de Prélèvement	Ref.	Description sommaire de l'échantillon	We	CO_3Ca
Petit-Palente Tranchée	II0	Marne grise à taches jaunâtres et bleuâtres	20	46,5
	III	Marne silteuse bariolée : grise à jaunâtre	I8	43,5
Petit-Palente R.N.73	II2	Shale marneux silteux gris		44
Petit-Palente S_2/6,60m	I24	Shale marneux silteux, gris, compact		46,5

TABLEAU DES RESULTATS DES

Besançon Clair-Soleil Fondations H.L.M.	IG	Shale marneux silteux gris-jaunâtre, compact		I5
	2	Shale marneux silteux gris		34
	3g	Shale marneux silteux gris, compact		48
Boussières Tranchée d'assainissement	I0	Marne panachée, gris à jaunâtre		33,5
Epeugney Marnière	II	Shale marneux silteux gris-jaunâtre		44

ANALYSES POUR LE CALLOVIEN

Wl	Wp	Ip	γh	γs	$\gamma \varepsilon$	n	e	$\frac{d_{50}}{/mm}$
38	2I	I7	2,I5	I,79		0,32	0,47	
35	20	I5	2,39	2,02		0,23	0,29	
32	I9	I3						
3I	20	II						

ANALYSES POUR L'OXFORDIEN

30	I9	II						
37	22	I5						
39	I8	2I						
46	22	24						

(SUITE)

Lieu de Prélèvement	Réf.	Description sommaire de l'échantillon	We	CO_3Ca
Fertans R.N.473	I3	Marne jaunâtre, à cailloux calcaires		36,5
Tarcenay Marnière	I7	Marne silteuse gris-jaunâtre à débris organiques		30
La Tuilerie R.N.67 Marnière	I8	Marne grise		4I
	I5	Shale marneux, gris		35
Besançon-Palente Ancienne Marnière	79	Shale marneux, gris, silteux	9	35
	8I	Shale marneux, gris, silteux		35
	82	Shale marneux, gris-clair, gypseux		4I
	78	Shale marneux, gris-bleu	I2	28
	83	Shale marneux, gris		43
	95	Shale marneux, gris-bleu		37,5
Besançon - Le Vernois. Anc.Marnière	93	Shale marneux, gris-bleu, à passées jaunâtres.	I7	34

(SUITE)

Wl	Wp	Ip	γ_h	γ_s	γ_g	n	e	d_{50} / $\sqrt{H}$
40	20	20						
35	20	I5						
35	I9	I4						
37	I9	I8						
42	20	22	2,33	2,I3		0,I9	0,23	
39	20	I9						
43	2I	22						
42	22	20	2,3I	2,06		0,2I	0,26	
40	2I	I9						
43	20	23						
43	20	23	2,I8	I,86	2,65	0,29	0,40	0,0025

(SUITE)

Lieu de Prélèvement	Ref.	Description sommaire de l'échantillon	We	CO_3 Ca
Besançon-Le-Vernois Anc.Marnière	94	Shale marneux gris-bleu, présentant des cristaux de gypse	I2	33,5
Chatillon-Le-Duc Tranchée	99	Marne gris-bleu, à passées jaunâtres et débris organiques		26
Besançon, rue de la Mouillère	II3	S.2/4,20m, marne crayeuse blanc-jaunâtre		65,5
	II4	S.2/9,00m, marne grise à oolithes ferrugineuse, très compacte		39
	II5	S.I/8,00m, marne silteuse, gris-ardoise, très compacte		52,5
Velotte S.IO Canal de la Citadelle	I20	7,30m, marne grise compacte		40,5
	I2I	8,80m, marne grise compacte		4I
	I22	II,I0m, shale marneux, gris, compact		36
Avanne S.I. Canal de la Citadelle	I25	9,60m, shale marneux, gris compact		32
	I26	II,I0m, shale marneux gris, compact		3I,5
	I27	I4,40m, shale marneux, gris, compact.		32,5

(SUITE)

Wl	Wp	Ip	γh	γs	γg	n	e	$d_{mm=0}$
45	I9	26	2,33	I,99		0,24	0,3I	
49	23	26						
37	2I	I6						
36	I9	I7						
30	I8	I2						
37	I8	I9						
33	I9	I4						
39	2I	I8						
42	2I	2I						
39	22	I7						
4I	I9	22						

(SUITE)

Lieu de Prélèvement	Ref.	Description sommaire de l'échantillon	Ve	CO_3Ca
Grandvillards (Sud de Belfort) Sondage	I23	213m, marne silteuse et micacée, gris-foncé, compacte		24,5
	I28	226m, marne silteuse et micacée, gris-foncé, compacte		20,5

TABLEAU DES RESULTATS DES

Besançon Clair-Soleil Fondations H.L.M.	96	Argilite sableuse, ocre	I6	0,5
	97	Marne sableuse jaunâtre	I8	39
	II6	Shale marneux, sableux, rouille		35,5
	II8	Shale marneux, sableux, bleu		41,5

TABLEAU DES RESULTATS DES

Valdahon R.N.46I	98	Shale marneux, gris, finement lité à intercalations gréseuses		37,5

(SUITE)

Wl	Wp	Ip	σ_h	σ_s	σ_R	ν	e	$\frac{d}{l_m}$-50
45	24	2I						
32	2I	II						
ANALYSES POUR L'ARGOVIEN								
35	2I	I4						
34	23	II	2,20	I,80		0,28	0,38	
38	23	I5						
35	22	I3						
ANALYSES POUR LE SEQUANIEN								
36	20	I6						

(SUITE)

Lieu de Prélèvement	Réf.	Description sommaire de l'échantillon	We	CO_3Ca
Besançon la Citadelle Sondages (Canal de la Citadelle)	I00	S.29/I0,I0m, marne siltèuse, beige-clair, à nodules calcaires		62
	I02	S.29/23,30m, marne gris-bleu, compacte		49,5
	I03	S.24/I5,20m, marne gris-bleu, compacte		3I
Velotte S.I (Canal de la Citadelle)	II9	I3,50m, marne grise, compacte à cailloux calcaires		33
		TABLEAU DES RESULTATS DES		
Besançon la Citadelle S.6 (Canal de la Citadelle)	I06	8,80m, marne gris-brunâtre à lentilles crayeuses, nombreuses exogyres et cailloux calcaires		53
	I07	I0,50m, marne beige à taches sombres et débris d'huîtres, cailloux calcaires et marneux		84,6

(SUITE)

Wl	Wp	Ip	γh	γs	γg	a	e	$\frac{d}{/mm^2}$
25	I7	8						
30	I8	I2						
29	I8	II						
29	I8	II						
ANALYSES POUR LE KIMMERIDGIEN								
3I	I9	I2						
22	I6	6						

Au cours de nos recherches nous avons étudié les caractères physiques de III échantillons, répartis ainsi :

- 27 échantillons du Lias moyen (Charmouthien)
- 4I échantillons du Lias supérieur (Toarcien et Aalénien)
- 36 échantillons du Callovien, Oxfordien et Argovien
- 7 échantillons du Séquanien et Kimméridgien

Ces échantillons, prélevés aux alentours de BESANCON et quelques autres points, au hasard de sondages ou de l'ouverture de tranchées, ou de fouilles que nous avons pu suivre, ont toujours été analysés dans les mêmes conditions.

Des résultats, mis en évidence par les tableaux, nous avons extrait les valeurs de Wl, obtenues sur les divers échantillons et les avons portées sur des verticales selon l'étage considéré. Le diagramme obtenu est tout à la fois quelque peu décevant et probant.

Décevant : car, ne présentant pas de lacunes particulièrement nettes, il est très difficile de décomposer les éléments de ce diagramme en familles naturelles, limitées par des séparations.

Probant : car étudiant des sédiments ayant sensiblement même histoire, il était tout à fait raisonnable de s'attendre à un tel diagramme.

Ne pouvant distinguer des groupes de valeurs se dessinant naturellement, nous avons procédé à une classification artificielle en prenant comme point de départ l'observation de Mr TERZAGHI, selon laquelle une différence arbitraire de 5 % entre les limites de liquidité de deux sols a une importance bien plus grande au point de vue des propriétés mécaniques, lorsque cette limite est basse, que lorsqu'elle est plus élevée.

Nous avons donc adopté les divisions suivantes :

- I°) de I0 à I0 x 2 I/2 (teneur en eau en pourcentage du poids total)
- 2°) de I0 x 2 I/2 à I0 x 2
- 3°) de I0 x 2 à I0 x 2 3/2
- 4°) de I0 x 2 3/2 à I0 x 2 2
- 5°) de I0 x 2 2 à I0 x 2 5/2
- 6°) de I0 x 2 5/2 à I0 x 2 3

et obtenu consécutivement quatre familles déduites des valeurs de la limite de liquidité et s'échelonnant de la façon suivante :

- Famille N° I :		Wl 56%	Très plastique
- Famille N° 2 :	56%	Wl 40%	Plastique
- Famille N° 3 :	40%	Wl 28%	Moyennement plastique
- Famille N° 4 :	28%	Wl	Peu plastique

En revanche nous n'avons pu procéder de la même façon avec les différentes valeurs de l'Indice de Plasticité. Les points représentatifs de ce paramètre ne donnant lieu à aucune lacune nette, il était très aléatoire d'entreprendre l'établissement de familles à partir des seules valeurs d'Ip. Par là même, toute confrontation entre les valeurs de Wl et de Ip était impossibles : en gros, les valeurs d'Ip et de Wl varient de la même façon.

3°) Relations entre les valeurs de Wl et la nature des matériaux.

Il eut été logique de reprendre la description des échantillons à l'intérieur de chaque famille et sous famille. Outre la monotonie qui se dégageait d'une telle énumération, les descriptions de tous les matériaux étudiés ont déjà été faites dans la première partie de ce travail, d'une part dans la description macroscopique des échantillons, étudiés dans le cadre de leur gisement, d'autre part dans leur description microscopique et reprises sommairement dans les tableaux accompagnant le présent chapître; nous nous sommes donc contenter d'indiquer la numérotation des échantillons et de donner les conclusions afférentes à chaque famille et sous famille, quand cela était nécessaire.

a) Famille I 56% < Wl

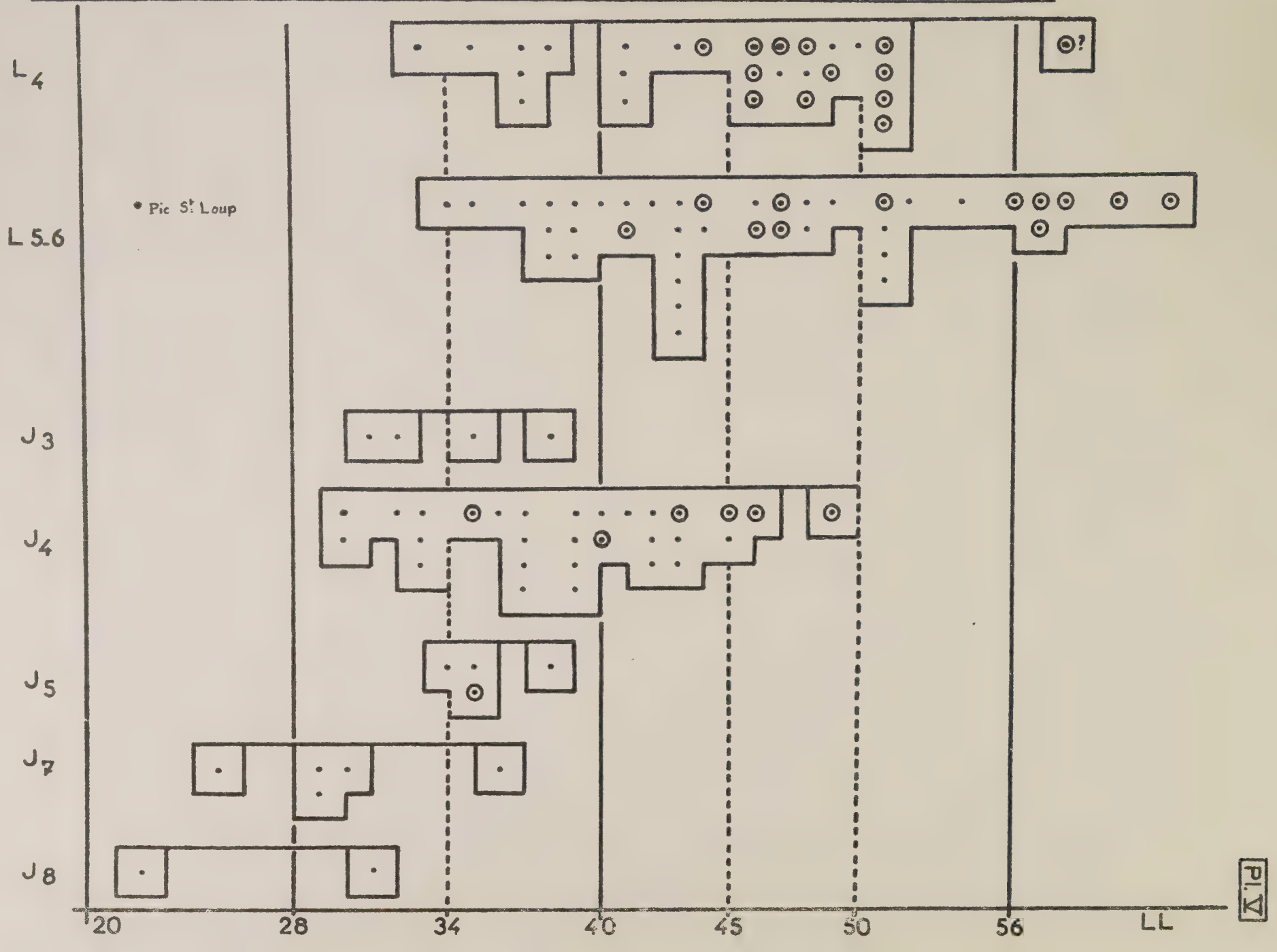
Charmouthien

Le seul échantillon entrant dans cette famille, est précisément la marne bariolée (échantillon 76) dont nous n'avons pu déterminer avec précision l'origine. La classement pétrotechnique semble donner un argument pour la classer à la limite Toarcien supérieur/Aalénien et la faire appartenir à une loupe de glissement, reposant sur le Charmouthien.

Lias supérieur

Echantillons 4 - 49 - 33 - 63 - 64 - 65. Ces trois derniers proviennent de la tranchée d'assainissement de Morre et ont été datés à la limite Toarcien/Aalénien sans que des arguments lithologiques ou micropaléontologiques aient pu lever l'imprécisions; ce sont des argilites silteuses rouilles pour les échantillons 63 et 65 et une marne bariolée pour l'échantillon 64.

Classification des échantillons en familles en fonction de W.L.



L'oxydation et la décalcification poussées des deux premiers échantillons semblent avoir eu pour effet d'élever les limites de liquidité et de plasticité. Par contre l'échantillon 64, légèrement altéré, a encore plus de I0% de carbonate de calcium et sa Wl, bien qu'encore élevée, est de ce fait moins importante.

Tous ces échantillons sont à des stades plus ou moins avancés, des matériaux très oxydés , décalcifiés et par conséquent dégradés.

b) Famille 2 40% < Wl < 56%

Sous famille 2a 50% < Wl < 56%

Charmouthien

Echantillons 23 - 27 - 59 - 9 - 39. Les quatre premiers échantillons sont des marnes ayant subi des altérations plus ou moins poussées.

Seul, le cinquième, un shale marneux (39) de la zone à Amaltheus margaritatus, semble préservé des altérations profondes. Cependant il fait partie d'un complexe de couches redressées au voisinage de la fouille de la Chapelle-des-Buis et est l'échantillon prélevé le plus près de cette faille.

La tectonisation de ces couches a pu jouer à l'échelle de l'échantillon en multipliant les minéraux applatis. Ce serait là le résultat d'une diagénèse mécanique. Il semblerait donc que le laminage tectonique aurait eu pour conséquence d'augmenter la Wl.

Lias supérieur

Echantillons 20 - 66 - 47 - 62 - 38 - 34. Dans la sous-famille 2a, on rencontre trois catégories d'échantillons :

- des matériaux qui ont subi une profonde altération chimique,

- des sédiments ayant pu être affectés par un accident tectonique assez important : en l'occurence la faille de la Chapelle-des-Buis,

- des marnes grasses des couches à Coeloceras crassum et Lytoceras jurense du Toarcien moyen.

Sous famille 2b 45% < Wl < 50%

Charmouthien

Echantillons 22 - 26 - 28 - 29 - 4I - 42 - 44 - 60 - 73 - 75

Lias supérieur

Echantillons 35 - 48 - 67 - 69 - 7I. Les échantillons représentatifs du Lias dans cette sous-famille sont tous plus ou moins altérés, remaniements chimiques se traduisant, soit par des teintes jaunâtres, soit par décalcifications quasi totales.

Oxfordien

Echantillons 99 - I0 - 94.

Le cas de l'échantillon I23, provenant d'un sondage au Sud de Belfort, mal daté, est beaucoup plus étrange, car il s'agit d'une marne silteuse, indurée très compacte, très dure, dont on ne pouvait s'attendre à ce que sa Wl soit comprise dans cette fourchette et seule, l'activité de la fraction colloïdale pourrait expliquer cette valeur relativement élevée.

A part le cas de l'échantillon I23, là encore, les trois autres échantillons de l'Oxfordien sont des échantillons remaniés comme ceux du Lias.

Sous famille 2c 40% < Wl ≤ 45%

Charmouthien

Echantillons 43 - 57 - 58 - 77.

Lias supérieur

Echantillons 30 - 37 - 45 - 68 - 70 - 85 - 86 - 92 - 90 - 05 et 06.

Bien que représentant les marques de remaniement ou franchement décalcifiés, ces échantillons ont une Wl relativement basse, qui peut s'expliquer par leur nature très silteuse.

Oxfordien

Echantillons I3 - 78 - 79 - 82 - 83 - 95 - I25 et I27.

Il apparaît que pour ces marnes, la nature granulométrique prédomine sur le degré de remaniement quant aux valeurs des limites d'Atterberg.

c) Famille 3 28% < Wl ≤ 40%

Sous famille 3c 34% < Wl ≤ 40%

Charmouthien

Echantillons 5 - 40 - 50 - 56 et 75

Lias supérieur

Echantillons I9 - 3I - 32 - 36 - 46 - 04 - 84 et 87

Callovien

Echantillons II0 et III

Oxfordien

Echantillons 2 - 36 - I5 - II3 - II4 - I20 - I22 et I26

Argovien

Echantillons 96 - 97 - II6 et II8

Séquanien

Echantillon 98

Nous constatons qu'il y a dans cette sous famille 3a, les derniers représentants du Lias et les premiers représentants des étages du Jurassique supérieur ; la totalité des échantillons de l'Argovien, ce qui est dû probablement au petit nombre d'échantillons analysés, tandis que l'Oxfordien déjà bien représenté dans la sous famille 2c, atteint ici un maximum d'extension.

Sous famille 3b $\leq 28\% < W1 < 34\%$

Lias

Echantillon 2I

Callovien

Echantillons II2 et I2I

Oxfordien

Echantillons IG - II - I8 - I2I et I28

Séquanien

Echantillons I02 - I03 - II9

Kimméridgien

Echantillon I06

Ces matériaux ne sont pas remaniés, l'échantillon type de cette sous famille est la marne silteuse et compacte de l'Oxfordien représentatif.

d) Famille 4 $20\% < W1 < 28\%$

On y rencontre les marnes beiges, a l'aspect crayeux de certains niveaux du Séquanien et du Kimméridgien, repré-

senté par les échantillons I00 et I07, dans les sondages 6 et 29 de la Citadelle (Besançon).

A titre indicatif un échantillon du Toarcien provenant du Lic St Loup (Hérault), macrose pi[illegible] et très voisin [illegible] ar-nes du Li[illegible] de Franche-Comté, présente un Wl très basse (Wl 22%), ce qui confi[illegible] à ces processus de cimentation et de consolidation, différents en ce qui concern[illegible] ces deux régions.

Conclusions

Cette classification empirique donne des résultats intéressants. C'est ainsi que dans le tableau ci-après, chaque étage écologique renferme, à l'exception notable, intégré [illegible] des faisceaux de valeurs de Wl correspondant à des groupes de sous familles, ce qui différencie nettement les sédiments du Lias de ceux du Jurassique supérieur.

Désignation des Sous famil.	4	3b	3a	2c	2b	2a	I
L5			Ech. en place		Ech. remaniés		
L5/6			Ech. en place		Ech. remaniés	Toarcien.	
J3		Marnes grises J3 sup.	Marnes jaunes J3 inf.				
J4			Marnes gris-bleu		Ech. remanié		
J5			J5				
J7	Marnes beiges	Marnes grises					
J8	Marnes beiges	Marnes grises					
Valeurs de Wl	20	28	34	40	45	50	56	65

4°) Variations des constantes physiques en fonction des teneurs relatives en argile et en "éléments détritiques".

Dans les paragraphes qui précèdent, on a pu voir que les constantes physiques varient, non seulement avec la structure minéralogique du liant colloïdal, mais encore avec les proportions relatives des "éléments détritiques" et de l'argile du sédiment.

On conçoit l'intérêt de pouvoir évaluer à partir des constantes physiques du mélange considéré, quelles seraient celles du liant colloïdal à l'état pratiquement pur. On pourrait ainsi avoir des indications intéressantes sur la nature de l'argile et par conséquent sur les qualités géotechniques du matériau considéré.

HOGENTOGLER (I937), a étudié ce problème sur des mélanges successifs comprenant des argiles analogues à une argile témoin et des sables analogues à un sable témoin.

A partir de multiples observations il a établi des abaques de conversion qui traduisent les variations de Wl, Ip, Wr, en fonction du pourcentage des éléments détritiques incorporés dans le mélange.

Nous avons choisi comme fraction granulométrique représentant le pourcentage d'éléments détritiques, celle ayant un diamètre supérieur à 0,05mm. Au-dessous, des minéraux de type détritique, existant encore, mais leur nombre et par conséquent leur influence n'est plus prépondérable, en fonction de la fraction argileuse.

Le terme d'éléments détritiques est pris ici dans un sens très large, si on considère à la suite de nos observations microscopiques que les éléments détritiques de nos matériaux ne sont constitués que par un faible pourcentage de quartz et une proportion très variable de minéraux micacés, son emploi paraît aberrant. Nous n'avons cependant pas trouvé de terme plus précis et aussi simple, pour englober les éléments des fractions sableuses et silteuses sous une même dénomination.

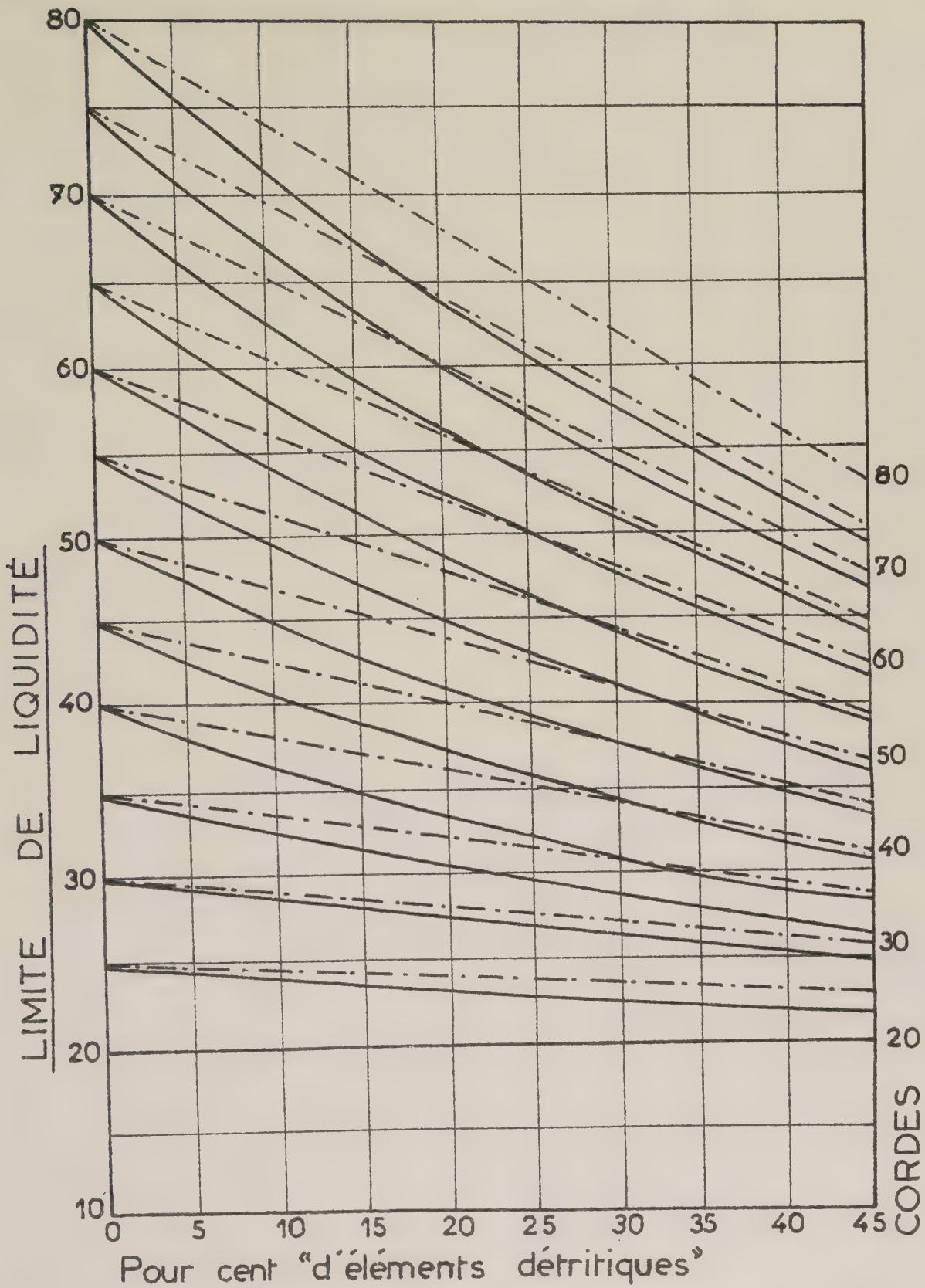
En fonction de la fourchette trop restreinte des valeurs d'Ip, nous n'avons utilisé que l'abaque de conversion concernant Wl.

Résultats :

Cette abaque confirme plusieurs hypothèses sans d'ailleurs les résoudre

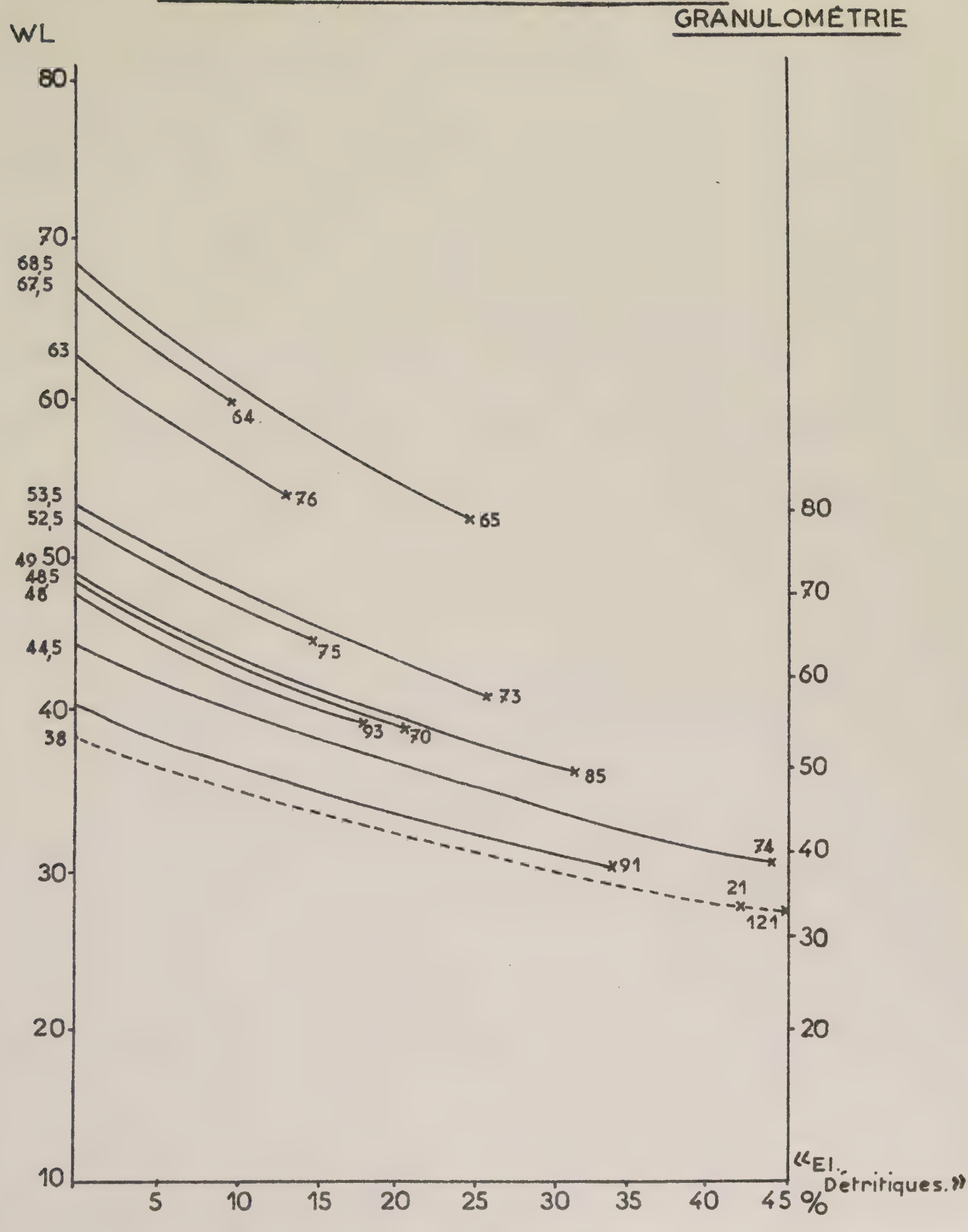
a) Elle nous donne le sens des variations de la limite de liquidité au voisinage du figuratif de l'argile nue. La valeur la plus

Variations de la limite de liquidité en fonction de la granulométrie.



ABAQUE DE CONVERSION (d'après HOGENTOGLER)

CONVERSION DES W.L. DE QUELQUES MARNES DU JURASSIQUE EN FONCTION DE LEUR GRANULOMÉTRIE



faible de celle-ci en serait approximativement 40, la plus forte 70.

Il est donc confirmé que les argiles auxquelles nous avons affaire sont très probablement : des Illites, des Kaolinites, certainement en proportions variables; à la rigueur des Halloysites.

b) L'abaque fait apparaître clairement que certains matériaux ayant même aspect macroscopique, une composition granulométrique et des teneurs en Co_3Ca, très voisines, comme les échantillons 76 et 75 sont des argiles de qualités sensiblement différentes. Il faut s'attendre à trouver beaucoup plus d'Illites dans l'échantillon 76 que dans le 75.

c) Sous certaines réserves, l'abaque donne sensiblement les constantes physiques du mélange considéré. On peut à ce sujet, classer les matériaux étudiés en 3 catégories.

- Si le pourcentage d'éléments détritiques avoisine 45% d'éléments détritiques, la Wl de l'argile pure est égale à 40%.
- Si les éléments détritiques : 25% .....Wl de l'argile ≃ 50%.
- Si les éléments détritiques : I0% .....Wl de l'argile ≃ 60%.

Par ailleurs, on peut noter que l'échantillon 65 qui est une argilite silteuse rouille est certainement un matériau profondément remanié qui révele des argiles assez "sensibles", produits de la diagenèse.

d) Limites à l'emploi des abaques de conversion.

On ne doit pas perdre de vue que l'abaque de conversion n'est utilisable, qu'avec des sols de qualité moyenne rappelant les sols témoins utilisés; on ne doit pas l'appliquer aux sols exceptionnels : sols à argiles gonflantes et sols organiques.

L'abaque de conversion utilisée ne s'étend pas aux limites de liquidité supérieures à 80, ni aux teneurs en éléments détritiques supérieures à 50%. HOGENTOGLER a en effet signalé, que les constantes physiques des matériaux détritiques influent très nettement sur le profil des courbes dès que ce pourcentage est dépassé.

o

oo oo

5°) Discussion

Si les limites d'Atterberg donnent des résultats valables concernant une éventuelle classification des sols, il est cependant évident que pour la plupart de ceux-ci, on ne pourra les dénommer si l'on s'appuie uniquement sur les essais de limites.

L'argument qui restait à l'origine des restrictions que l'on pouvait faire à l'encontre d'une classification purement granulométrique, peut également être repris ici. A savoir, qu'une marne est une association de minéraux de natures diverses et que cet ensemble englobant des silicates hydratés alumniques, des alumines magnesiens ou ferriques et des carbonates divers, ne saurait être géotechniquement définie qu'en introduisant ses caractéristiques chimiques.

Il est connu q'un faible pourcentage de matières humiques a, pour conséquence d'augmenter notablement les limites de liquidité et de plasticité. Les limites d'Atterberg peuvent par conséquent, servir de critère éliminatoire, mais non pas de critère absolu.

Pour illustrer par un exemple ces difficultés, prenons l'échantillon I25; nous avons affaire à un shale marneux gris très compact provenant d'un sondage effectué à Avanne. Si nous considérons ses limites d'Atterberg nous avons :

- Wl = 42, Wp = 2I, Ip = 2I.

En écartant l'hypothèse que l'on a affaire à un sable, on peut dire indistinctement en se basant uniquement sur ses limites, que c'est un limon ou une argile. La courbe granulométrique tranchera entre les deux, mais seule une analyse chimique simple apportera l'argument décisif, à savoir que c'est une marne.

C - CLASSIFICATION BASEE SUR L'ANALYSE CHIMIQUE

I°) Des analyses chimiques, trop peu nombreuses pour pouvoir en tirer des conclusions définitives, ont été faites sur quelques échantillons et consignés dans le tableau ci-joint.

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES POUR QUELQUES ECH. DU LIAS

Numéros des Echantillons	73 (L4)	47 (L5)	90 (L5)	04 (L6)	84 (L6)	85 (L6)	87 (L6)	J3	J4
SiO_2	53,75	48,35	35,00	49,80	55,90	57,70	58,60	46,I0	53,80
Al_2O_3	I7,50	22,00	I4,50	20,40	I4,20	I5,I0	I5,70	I5,35	2I,90
Fe_2O_3	4,07	5,28	4,53	3,40	5,7I	4,72	5,03	2,05	4,25
F_2O	0,52	0,75		2,00				2,30	I,70
MgO	I,62	I,57	2,26	5,22	I,83	I,69	3,I2	6,30	2,40
CaO	5,44	4,68	I7,90	2,00	7,35	6,80	5,7I	5,I5	I,25
Na_2O	0,70	0,42	0,32	0,30	0,30	0,28	0,28	2,80	0,23
K_2O	3,38	3,35	2,57	3,60	3,32	3,I8	2,87	4,25	4,00
P_2O_5	0,38	0,89		0,48				0,I6	0,08
TiO_2	0,89	I,0I	0,99	0,94	I,I6	I,I4	I,03	0,70	0,65
H_2O et mat. humiques	4,70	7,60	I9,60	7,73	9,92	9,28	7,97	I4,80	I0,60
H_2O	2,78	2,58		2,20					
CO_2	3,40	2,I0		I,40					
TOTAUX	99,I3	I00,59	99,78	99,47	99,69	99,89	I00,3I	I00,02	I00,87

- En regard et dans un but comparatif, ont été donné les résultats de l'analyse chimique de deux échantillons du Jurassique supérieur.

Echantillon 73 - Marne gris-jaunâtre, silteuse micacée, compacte, Charmouthien, (Morre).

Echantillon 47 - Marne noirâtre, plastique, Toarcien, (Morre).

Echantillon 90 - Shale marneux, gris-jaunâtre, silteux et micacé, Toarcien, (Ecole).

Echantillon 04 - Shale marneux, gris-bleu, silteux, Aalénien, (Lanterne-Vertière).

Les trois échantillons suivants ont tous été retirés au fond de taille de la marnière d'Ecole, actuellement exploitée dans l'Aalénien inférieur.

Echantillon 84 - 8m. Fine alternance de Marne noire et de lits limoniteux jaunâtres, très micacés.

Echantillon 85 - 4m. Shale marneux, gris jaunâtre, micacé.

Echantillon 87 - 2m. Marne silteuse et micacée, plus ou moins rouille.

Les échantillons de Callovien et d'Oxfordien proviennent respectivement de LA SEIGNE (Doubs) et d'ECROUVES (Meurthe et Moselle).

Les matériaux choisis pour ces analyses, montrent une assez grande diversité, tout au moins quant à leur faciès macroscopique, cependant le dépouillement des résultats de l'analyse chimique ne révèle aucune différence notable.

a) On peut distinguer une variation de 20% sur la teneur en silice, la plus basse qui est caractéristique de l'échantillon 90 du Toarcien supérieur de l'ancienne marnière d'Ecole; et la plus haute pour l'échantillon 87 de l'Aalénien inférieur de la marnière exploitée d'Ecole. Variation qui s'explique naturellement par l'intensité plus ou moins forte de l'apport détritique.

b) On notera la présence toujours plus importante du potassium par rapport au sodium, ce qui est l'inverse de ce qui a lieu dans la majorité des solutions naturelles.

La fixation de ces éléments alcalins absorbés a pu être sélectionnée au cours de phénomènes de transport et de sédimentation, par la plus forte tension de polarisation des ions K+, (URBAIN 1951).

c) Seule la teneur en carbonate de calcium présente des variations spectaculaires

+

2°) Il est depuis fort longtemps établi, qu'une marne voit ses limites d'Atterberg varier en fonction de sa teneur en carbonate de calcium.

Nous avons essayé de vérifier cette donnée en procédant à l'analyse systématique de tous les échantillons par la méthode simple du dosage du carbonate de calcium, à l'aide du calcimètre de Bernard.

Les résultats obtenus ont été portés sur trois graphiques à coordonnées arithmétiques, avec d'une part la teneur en Co_3Ca, d'autre part, la limite de liquidité.

Nous avons choisi cette dernière dans le même esprit, la fourchette d'extension des points représentatifs étant plus large pour ces valeurs que pour les valeurs de la limite de plasticité ou de l'indice de plasticité.

a) Sur le premier graphique sont portés les points représentatifs du Charmouthien.

b) Sur le deuxième, nous avons groupé les points représentant le Toarcien et l'Aalénien inférieur. Leur distinction étant difficile sur le terrain et leur dépôt ayant fonctionné d'une façon continue, sans interruption marquée de leur mode de sédimentation.

c) Enfin, sur le troisième graphique, sont consignés tous les points représentatifs du Jurassique supérieur.

Les résultats ne sont pas convaincants pour le Lias supérieur, où les valeurs de Co_3Ca peu élevées, ne permettent pas l'éparpillement des points représentatifs; ils le sont par contre en ce qui concerne le Charmouthien et le Jurassique supérieur.

En principe, ces diagrammes doivent être perfectibles. Il ne faut pas oublier que :

- l'utilisation de l'appareil de Cassagrande pour l'établissement des limites, reste influencé par des facteurs personnels, bien que l'essai soit normalisé.

- De même, le calcimètre Bernard est assez imprécis, ce sont des critères de commodité qui nous l'ont fait adopter.

- Le remaniement des échantillons plus ou moins important qui influence directement la dispersion des valeurs, laisse l'incertitude sur la teneur initiale, tant de l'argile que du Co_3Ca, et fait intervenir une nouvelle cause d'erreur.

.- DIAGRAMME DE CORRÉLATION ENTRE W.L. EN FONCTION DE CO_3Ca DANS LES MARNES DU CHARMOUTHIEN -.

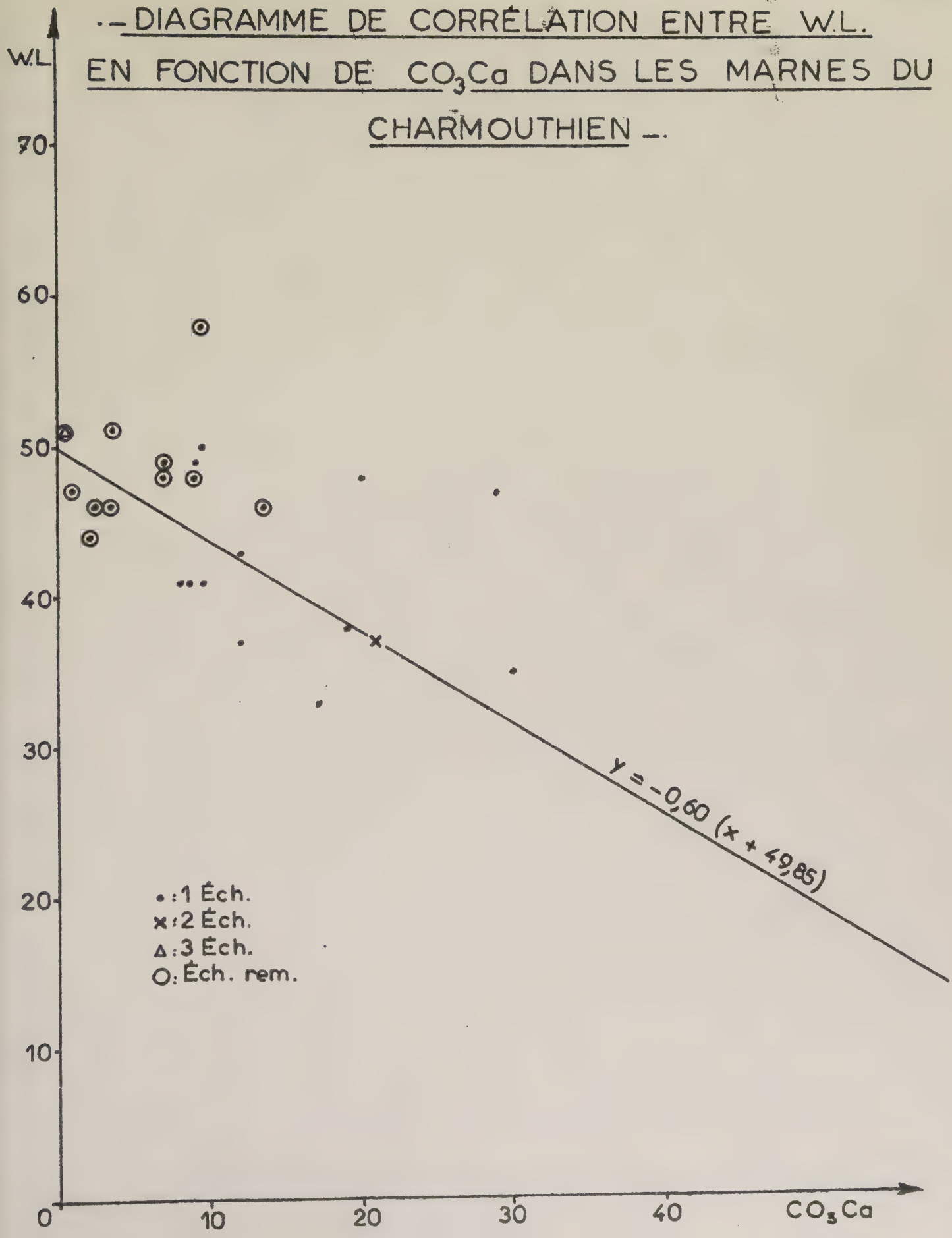
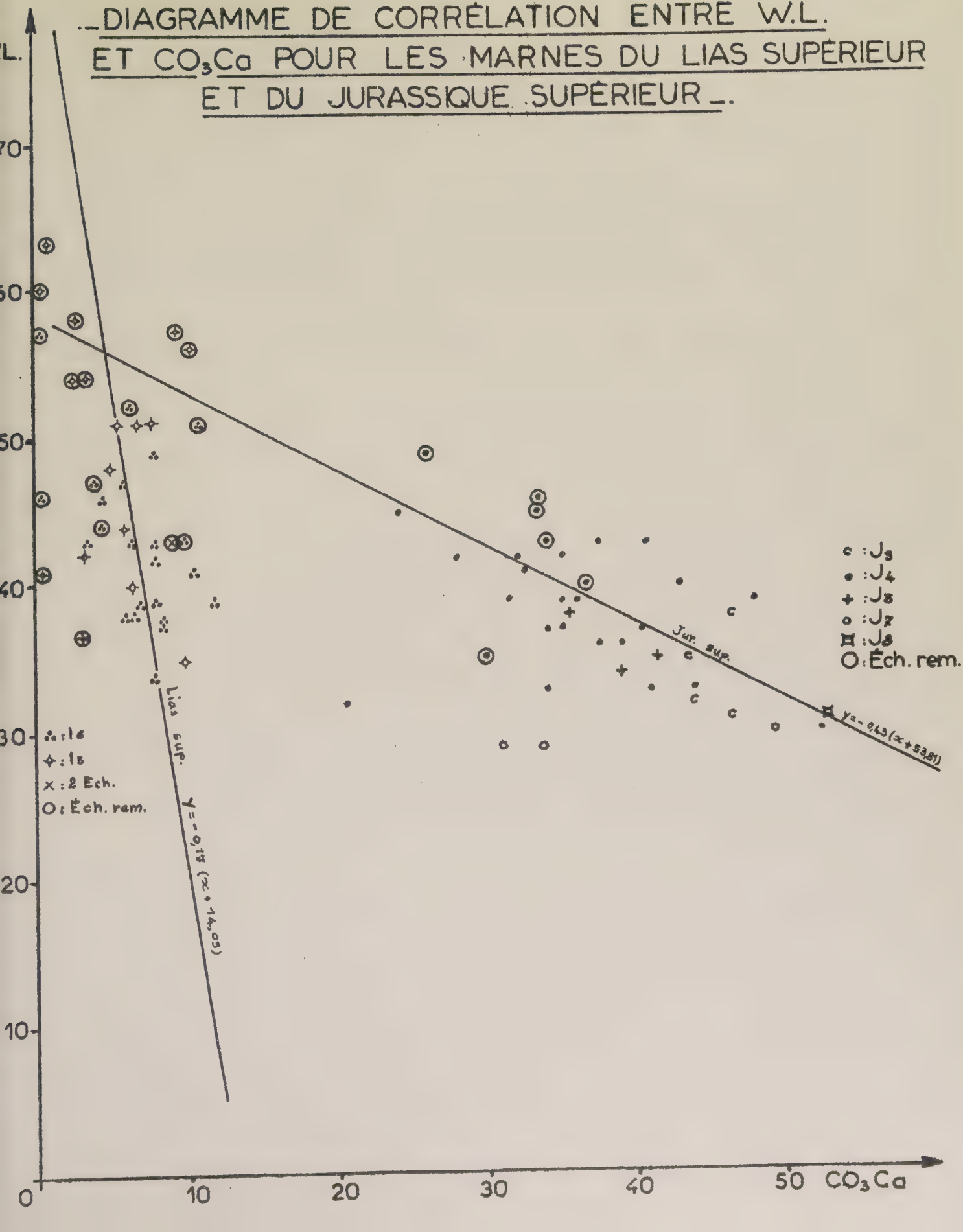


DIAGRAMME DE CORRÉLATION ENTRE W.L. ET CO_3Ca POUR LES MARNES DU LIAS SUPÉRIEUR ET DU JURASSIQUE SUPÉRIEUR



3°) Calcul de corrélation entre la limite de liquidité et le pourcentage en Co_3Ca.

Méthode.

La méthode de calcul des paramètres de regression et de corrélation exposée par M. LAMOTTE ("Introduction à la biologie quantitative"), puis reprise et adaptée récemment par M. VANCON (1965), à des problèmes hydrogéologiques, nous a servi à établir ces corrélations.

Elle ne s'applique que sur une relation linéaire de la forme,

$$Y = x X + A$$

Sans entrer dans l'exposé théorique de la méthode, nous nous bornerons à dégager les valeurs des coefficients qui nous intéressent :

soient :

- Le coefficient de régression de Y en X : $b \frac{y}{x}$
- Le coefficient de régression de X en Y : $b \frac{x}{y}$
- Le coefficient de corrélation : r

a) Signification du coefficient de corrélation.

Ce dernier justifie, ou pas, de la valeur de la corrélation qui varie obligatoirement entre + 1 et - 1.

La corrélation est parfaite si : $r = \pm 1$, si au contraire : $r = o$, cette corrélation n'existe pas.

En outre, le signe de r, implique le signe de la pente de la droite :

- si r est positif : la pente de la droite est positive
- si r est négatif : la pente de la droite est négative.

b) Signification des coefficients de régression.

Le coefficient de régression $b \frac{y}{x}$, nous donne la valeur de la pente de la droite mesurée par rapport à l'axe des X, quand on prend comme référence les valeurs de x. Ceci implique que les valeurs de x servent de point de départ et que ces valeurs sont à priori, justes, les valeurs de Y étant les seules dispersées.

Le coefficient de régression b $\frac{x}{y}$ est justifiable du même raisonnement.

Résultats.

Les résultats ont été alignés dans le tableau ci-après.

Etage Considéré	Charmouthien marneux	Lias supérieur Toarcien + Aalénien infér.	Jurassique sup. marneux
Nbre d'échant.	24 Ech.	39 Ech.	39 Ech.
b $\frac{y}{x}$	- 0,603	- 0,963	- 0,432
b $\frac{x}{y}$	- I,063	- 0,I72	- 0,907
r	- 0,800	- 0,407	- 0,626

La valeur de : r, est significative pour le Charmouthien, moyenne pour le Jurassique supérieur, comme nous pouvions nous y attendre. La corrélation y est cependant prise en évidence.

Dans un dernier stade, il nous restrait à donner les équations des courbes représentatives de ces corrélations.

Ces courbes sont des droites de pente négative de la forme :

$$Y = - ax + b$$

Ces équations représentatives des droites sont :

- Charmouthien, $Y_1 = - 0,603\ x + 49,856$
- Lias supérieur, $Y_2 = - 0,I72\ x + I4,090$
- Jurassique supér., $Y_3 = - 0,432\ x + 53,8I4$

On notera que x, sur l'axe des abaisses représente :

- Le pourcentage en Co_3 Ca, pour Y_1 et Y_3
- La limite de liquidité, pour Y_2.

4°) Hypothèses sur les mécanismes de décalcification.

Nous avons mis en évidence que la limite de liquidité augmente lorsque la teneur en Co_3Ca diminue :

Il est donc intéressant de connaître le pourquoi de ces variations, en fonction de la teneur en carbonate de calcium.

a) Sédimentation

Les conditions physico-chimiques du dépôt des sédiments ont joué un rôle important dans le transport et la précipitation du carbonate de calcium.

C'est ainsi qu'on peu généralement observer, que les sédiments du Jurassique supérieur ont une teneur en carbonate de calcium nettement plus forte que les sédiments liasiques.

b) Altération chimique et biochimique

L'altération en surface des sédiments en place, affectant toute la structure minéralogique du matériau, a des conséquences très variables.

La décalcification en particulier, semble conserver à la marne l'essentiel de son squelette minéralogique, la consistance du matériau s'opposant par ailleurs, à une décalcification trop intense . Il nous a paru, sans avoir les moyens de le déterminer, que les sédiments les plus calcaires résistaient le mieux aux effets de l'altération chimique en surface.

c) Altération mécanique et chimique

Il s'agit des glissements divers qui affectent communément les sédiments argileux dès que l'angle que forme le talus argileux avec l'horizontal, devient supérieur à l'angle de frottement, et que le matériau atteint sa limite de liquidité.

Si la marne a été remaniée mécaniquement par un glissement de grande amplitude qui a transformé la structure intime du matériau, son poids spécifique apparent a chuté consécutivement dans de notables proportions. Dans ce cas, l'altération chimique à l'air beaucoup plus rapide et nette : la décalcification est pratiquement totale. Nous en avons eu un témoignage parmi d'autres, dans le quartier de Besançon-Clair-Soleil, où des fouilles nous ont permis d'échantillonner une argilite silteuse ocre-jaune, argovienne, dont la teneur en Co_3Ca ne dépassait guère 0,5%; ce matériau étant manifestement le produit d'un glissement ayant affecté le talus surplombant la combe.

Conclusions

Un grand nombre de causes semble procéder à l'altération physico-chimique et par conséquent à la décalcification. Il paraît illusoire d'essayer d'en tirer une loi générale.

L'ingénieur ne devra jamais perdre de vue, que des marnes mises à jour, même très compactes, sont susceptibles de gonflement, de glissements en paquets, d'altération chimique plus ou moins rapide, sous peine de s'attirer de graves inconvénients.

Sur le terrain, l'altération de la marne se traduit, par des couleurs jaunâtres, une augmentation générale de la teneur en eau.

De gris et compact qu'il est en général, ce matériau devient une argile bariolée, puis rouille, plastique. Cette transformation peut être accompagnée par l'apparition de cristaux de gypse.

Les shales par contre, semblent beaucoup mieux lutter contre ces altérations, les surfaces d'arrêt de la stratification se couvre d'un enduit brunâtre, noiré, très argileux donc plus imperméable qui paraît isoler efficacement des agents météoriques.

Pour traduire cette remarque, on peut observer qu'aucun shale du Charmouthien ne paraissait profondément altéré. Dans le Toarcien un seul shale (éch. 49 - Trou-au-Loup), paraît attaqué; deux, dans l'Aalénien (éch. 34 - Le Grand Trouchot et 69 - Sciorie de Valentin). L'Oxfordien composé par une majorité de shales n'a que très peu d'échantillons altérés.

Cette rareté des shales attaqués, pourrait également s'expliquer dans le fait que l'altération chimique est capable de bouleverser la structure litée du sédiment.

L'existence, à la Marnière du Vernois, de shales ayant conservé leur structure macroscopique, bien que l'altération soit consécutive à l'arrêt déjà ancien de l'exploitation de la tuilerie, semble infirmer cette idée sans qu'aucun autre fait positif confirme l'une ou l'autre des deux hypothèses discutées.

D -CONCLUSIONS RELATIVES AUX CARACTERISTIQUES PHISICO-CHIMIQUES.

Il résulte des considérations qui précèdent, que conventionnellement, on peut proposer une classification de ces sédiments en fonction des préoccupations du géologue.

On a pu constater que toute classification du point de vue géotechnique est basée sur la granulométrie, les limites d'Atterberg et la teneur en carbonate et calcium des sédiments. Ces trois bases sont concrètes et définies en elles-mêmes : elles ont une signification intrinsèque qui est suffisante et indépendante de tout vocabulaire.

o

oO Oo

V - CARACTERISTIQUES MECANIQUES

A - INTRODUCTION

La courbe granulométrique, les limites d'Atterberg, la teneur en eau donnent de nombreuses indications sur les propriétés mécaniques des sols rencontrés.

Les caractéristiques mécaniques, nécessaires pour procéder à une étude géotechnique complète sont principalement, l'angle de frottement interne, la cohésion, la compressibilité. Les valeurs numériques de ces divers facteurs dépendent de nombreuses variables; entre autres : le volume des vides, la compacité, la structure, la forme des grains, la composition chimique et minéralogique.

Il serait donc abusif, d'espérer obtenir des chiffres exacts en les déduisant des courbes granulométriques ou même des limites d'Atterberg, qui pourtant, tiennent compte des propriétés complexes de la matière.

On peut par contre en déduire des indications qualitatives et relatives des caractéristiques mécaniques.

I°) Angle de frottement interne

La résistance au cisaillement d'un terrain argileux se compose de deux termes : l'un étant la cohésion, l'autre l'angle de frottement interne.

La cohésion peut être définie comme la résistance au cisaillement sous une contrainte verticale nulle.

La résistance au cisaillement peut ainsi se définir par la relation :

$$S = Co + p \operatorname{tg} \varphi$$

Co étant la cohésion
p la pression appliquée
φ l'angle de frottement interne.

Le cisaillement se mesure à l'aide de la boite de CASSAGRANDE et plus récemment de l'appareil triaxial. On s'aperçoit que l'angle de frottement est plus grand pour les sols limoneux ou sableux que pour les sols argileux. Ce fait est confirmé par les valeurs de l'Indice de Plasticité. Des essais comparatifs dûs, principalement à FREIBERG, ont montré qu'il existe une relation sensiblement linéaire entre les valeurs de l'angle de frottement et d'Ip.

Les points représentatifs des échantillons s'alignant autour d'une droite d'équation :

$$tg \varphi = 0{,}58 - 0{,}0045 \ Ip$$

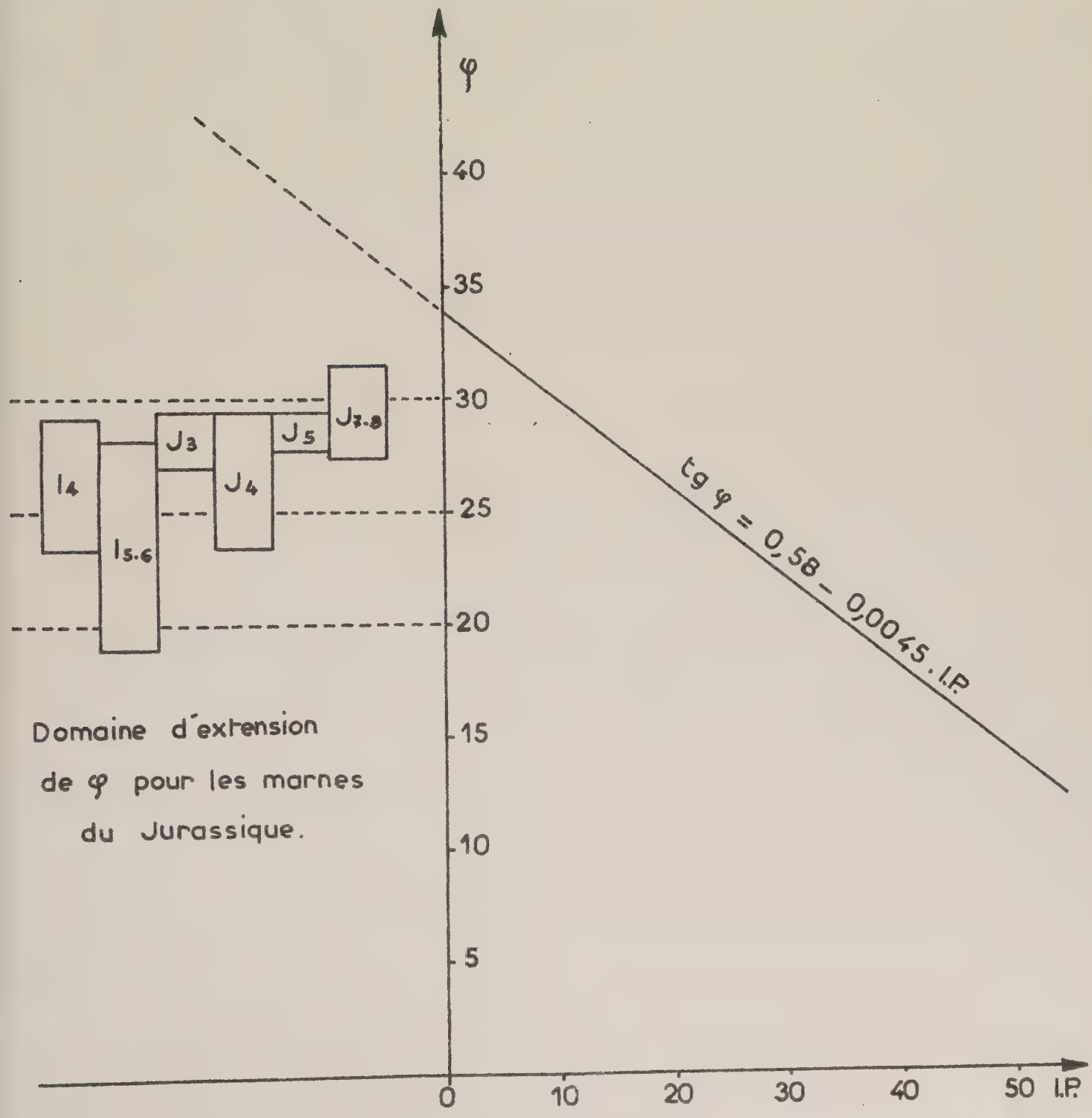
L'angle de frottement interne atteint environ 35° lorsque Ip = 0. Il décroit lorsque Ip augment en valeur positive.

En utilisant le diagramme dû à FREIBERG, nous avons obtenu les valeurs minima et maxima de φ, pour les différents étages considérés. Ces résultats sont consignés dans le tableau qui suit :

	min.	max.
CHARMOUTHIEN	23°	29°
LIAS SUPERIEUR MARNEUX	I9°	28°
CALLOVIEN	27°	30°
OXFORDIEN	23°	30°
ARGOVIEN	27°	30°
SEQUANIEN-KIMMERIDGIEN	27°	32°

RELATION ENTRE I.P. ET φ

D'après FREIBERG



Par ailleurs, la limite de liquidité Wl donne des indications sur la résistance au frottement puisqu'elle correspond à la teneur en eau qui permet à l'échantillon de s'écouler librement sous son propre poids.

D'une façon générale pour des sols de composition identique, la Wl augmente lorsque la dimension des grains diminue : ce qui entraine une augmentation de la surface spécifique, donc des forces de tension, par conséquent la résistance de frottement.

2°) Cohésion

On doit distinguer ici, la cohésion vraie de la cohésion apparente. La première, est le résultat des phénomènes d'attraction moléculaire de pression capillaire, aux frottement de surface existant entre les particules. Comme on vient de le voir ce phénomène n'existe que si les grains sont suffisamment petits pour présenter une grande surface spécifique, ce qui est vrai dans le cas de nos sédiments.

La cohésion dépend donc essentiellement de la teneur en eau et de la finesse des grains.

Pour les marnes qui font l'objet de notre étude, dont la teneur en eau est le plus souvent inférieure à la limite de plasticité, et qui se trouvent à l'état presque solide, on trouve une très grande cohésion.

Au-dessus de la limite de plasticité, l'eau en excédent possède les propriétés de l'eau libre. Au-dessous, l'eau est sujette à des phénomènes de semi-solidification et agit comme un liant dont la viscosité influe sur la cohésion. Celle-ci devient nulle lorsque la teneur en eau atteint la limite de liquidité.

On peut dire que l'Indice de plasticité donne une mesure de la cohésion que possède le sédiment.

Il est admis, après essais comparatifs, que la différence entre l'Indice de plasticité et le quart de la limite de liquidité donne des renseignements sur les proportions relatives de cohésion vraie que possèdent les particules du sol considéré :

$$Co = Ip - \frac{1}{4} Wl$$

Le rôle de la cohésion vraie ne doit pas nous faire perdre de vue l'importance de la cohésion apparente.

Il a pu être démontré (M. BUISSON I942), que les pressions qui se développent dans l'argile du fait de la pression capillaire sont d'un ordre de grandeur assez élevé, supérieures souvent à celles résultant des contraintes imposées aux sols.

Cette cohésion apparente peut se transformer partiellement en cohésion vraie, par suite de la cristallisation des sels dissous qui agiraient comme un ciment à la suite de l'attraction moléculaire.

3°) Compressibilité

Une marne jurassique, qui est à l'état naturel, non altérée, pratiquement solide, est peu déformable, dès lors que sa teneur en eau est inférieure à sa limite de plasticité.

Sa déformabilité croît, lorsque sa teneur en eau augmente et se rapproche de la limite de liquidité.

D'autre part, on constate qu'il existe une relation entre l'Indice de plasticité et la compressibilité d'un sol argileux. Cette dernière est approximativement proportionnelle à Ip.

\+ + +

Les déductions faites des limites d'Atterberg, seront dans bien des cas suffisantes pour permettre l'étude du système de fondation a adopter. De toute façon, elles seront de loin plus précises que les règles empiriques prévalant le plus souvent. C'est dans le cas de travaux importants, difficiles qu'elles se révèlent insuffisantes, ce qui implique des essais complets tant en laboratoire, qu'in situ.

Il ne faut cependant pas oublier que les lois qui relient entre elles les propriétés physiques et les propriétés mécaniques des sols sont encore mal connues. Elles constituent cependant un des champ d'investigation les plus intéressant.

B - CLASSIFICATION GEOTECHNIQUE DES ECHANTILLONS AU MOYEN DES ABAQUES DE PLASTICITE.

Dans un chapître précédent, les valeurs de Wl ont permis d'établir une classification subjective.

Cette classification est évidemment insuffisante quant il s'agit de faire entrer les valeurs de chaque échantillon dans un système cohérent, immédiatement utilisable par l'ingénieur. Nous avons donc utilisé une abaque de plasticité. Dans celle-ci, les coordonnées représentent Ip et les abaques : Wl.

I°) Abaque de plasticité U.S.C.S.

Parmi toutes les abaques proposées, nous avons naturellement extrait la classification U.S.C.S., pour les sols fins

(UNIFIED) SOILS CLASSIFICATION SYSTEM), aboutissement du diagramme de Cassagrande, et qui tend actuellement à être employé par tous les organismes officiels ou privés.

Dans une telle abaque, l'expérience montre que les points représentatifs de divers échantillons d'une même couche sédimentaire forme en gros une ligne droite parallèle à une ligne théorique, dénommée ligne A, dont l'équation est :

$$Ip = 0,73 \ (Wl - 20)$$

La ligne A et une verticale passant par le point où Wl = 50, divisent l'abaque en quatre régions. Les sédiments argileux inorganiques ont en gros, leurs points représentatifs au-dessus de la ligne A, et les limons inorganiques, au-dessous de celle-ci.

Ce diagramme ne nous donnait pas entière satisfaction. En effet, les sédiments marneux jurassiques ont leurs points représentatifs qui dessinent un groupe monolithique intéressant dans sa majorité, une seule des quatres régions de l'abaque et à un degré moindre, une autre; ces deux régions étant situées au-dessus de la ligne A.

2°) Le Diagramme d'HOGENTOGLER.

La recherche d'une solution satisfaisante pour la classification de nos sédiments, nous a amené à reconsidérer le diagramme d'Hogentogler utilisé par l'United States Bureau of Public Roads.

Ce diagramme plus complexe que l'abaque de CASSAGRANDE, méxite qu'on s'y attarde quelques instants.

La partant des axiomes selon lesquels : les constantes physiques sont associées à une consistance parfaitement déterminée du sol considéré et qu'il existe une liaison entre les valeurs relatives des constantes physiques d'un sol et la structure des particules qui le constituent, HOGENTOGLER a commencé par définir un certain nombre de sols-témoins, possédant une structure bien caractérisée et des constantes physiques moyenne, en égard à cette structure.

Ils sont au nombre de sept : sable, limon, argile, ultraargile, mica, diatomite, tourbe, et constituent en quelque sorte une schématisation des sols réels, ces derniers se présentant évidemment dans la nature avec une structure infiniment plus nuancée.

Hogentogler, dans un deuxième temps, a étudié systématiquement les constantes physiques de sols artificiels à base de mélanges binaires ou ternaires, à proportions variables de sols témoins.

Ces mélanges lui ont permis : d'étudier les variations relatives des constantes physiques avec le pourcentage des différents constituants.

Il est ainsi possible, étant donné un sol quelconque, de raccrocher celui-ci à un ou plusieurs mélanges repères représentant des constantes physiques très voisines.

Si on groupe les mélanges de sols-témoins par catégories représentant les mêmes caractères colloïdaux, on trouve que les points représentatifs (Ip, Wl) se situent approximativement sur les droites numérotées I, 2, 3, 4, (voir Planche XI).

- La droite (I) d'équation Ip = 0, correspond aux sables, aux sols expansifs non cohérents (mica, diatomite), et aux sols organiques.
- La droite (2), Ip = 0,25 Wl, correspond surtout à des limons et sols à forte proportion de silt, ne contenant généralement que des colloïdes très grossiers.
- La droite (3), Ip = 0,625 (Wl - I4), correspond à des argiles impures; marnes, argiles silteuses.
- La droite (4), Ip = 0,94 (Wl - 14), correspond à des sols à proportion dominante de colloïdes très actifs.

Pour préciser l'identification, le diagramme a été divisé empiriquement en un certain nombre de zones limitées par les axes suivantes : (Voir planche XI)

- Limite A : l'axe des Wl, confondu avec la droite Ip = 0
- Limite B : une droite passant par l'origine et de pente 0,10
- Limite C : un segment de droite joignant d'une part l'intersection des droites (2) et (3), d'autre part le point de coordonnées Ip = 40, Wl = 100; puis au-delà, une droite issue de ce dernier point avec une pente de 0,40.
- Limite D : un segment de droite joignant d'une part l'intersection droites (3) et (4), d'autre part, le point de coordonnées Ip = 70, Wl = 100; puis au delà, une droite issue de ce point avec une pente de 0,70.

Ces limites permettent de classer les sols dans différentes catégories selon leur plasticité relative ✂ .

En résumé nous avons la classification suivante :

Zone du diagramme	Dénomination du sol	Plasticité relative	Cohésion du matériau
I	pulvérulent	négative ou nulle $\alpha \leq 0$	Non cohérent
II	friable	très faible $0 < \alpha < 0,10$	
III	peu plastique	faible $0,10 < \alpha < 0,40$	
IV	moyennement plastique	moyenne $0,40 < \alpha < 0,70$	cohérent
V	très plastique	$0,70 < \alpha$	
VI	Indétermination		Cohérent ou non cohérent

Cette dernière zone est celle où s'inscrivent les points représentatifs des échantillons ayant une Wl $\leq$ 40. Vers ces valeurs on se rapproche des points d'intersection des droites (2) (3) et (4). Or, celles-ci expriment un résultat moyen obtenu sur un grand nombre de mesures dont les points figuratifs s'écartent plus ou moins de la droite théorique. On doit donc considérer qu'un sédiment qui est représenté dans cette région du diagramme peut appartenir à l'une ou l'autre des catégories précitées.

Seules dans ce cas, les analyses granulométriques et chimiques sont susceptibles de lever l'indétermination.

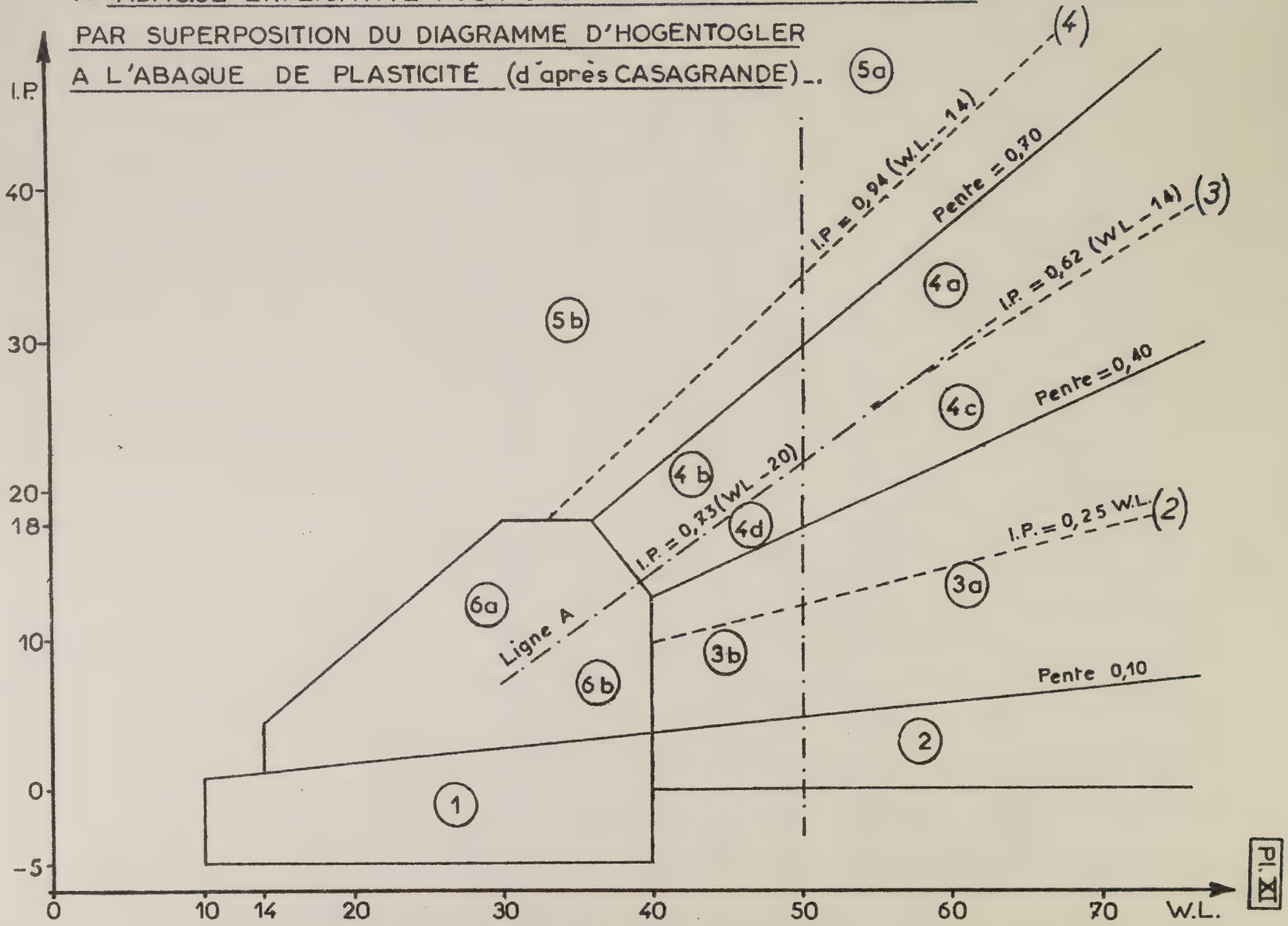
Résultats

En intégrant nos échantillons dans ce système de classification, nous sommes frappés par le fait que la majorité des échantillons se trouve dans la zone IV, certains côtoyant la zone V.

Ils sont ainsi parfaitement définis et l'homogénéité du groupe de sédiments, démontrée.

Une difficulté demeure : les autres échantillons pour la plupart, du Jurassique supérieur sont pointés dans la zone VI d'indétermination.

.- ABAQUE EXPLICATIVE POUR UNE CLASSIFICATION DES SOLS PAR SUPERPOSITION DU DIAGRAMME D'HOGENTOGLER A L'ABAQUE DE PLASTICITÉ (d'après CASAGRANDE) ..



Pl. XI

3°) Essai de "classification combinée"

Nous avons remarqué que la ligne A de l'abaque de plasticité coincidait sensiblement avec la droite (3), du diagramme d'Hogentogler; ceci nous a permis de confondre les deux abaques et de les combiner.

Cette combinaison graphique avait un double avantage.

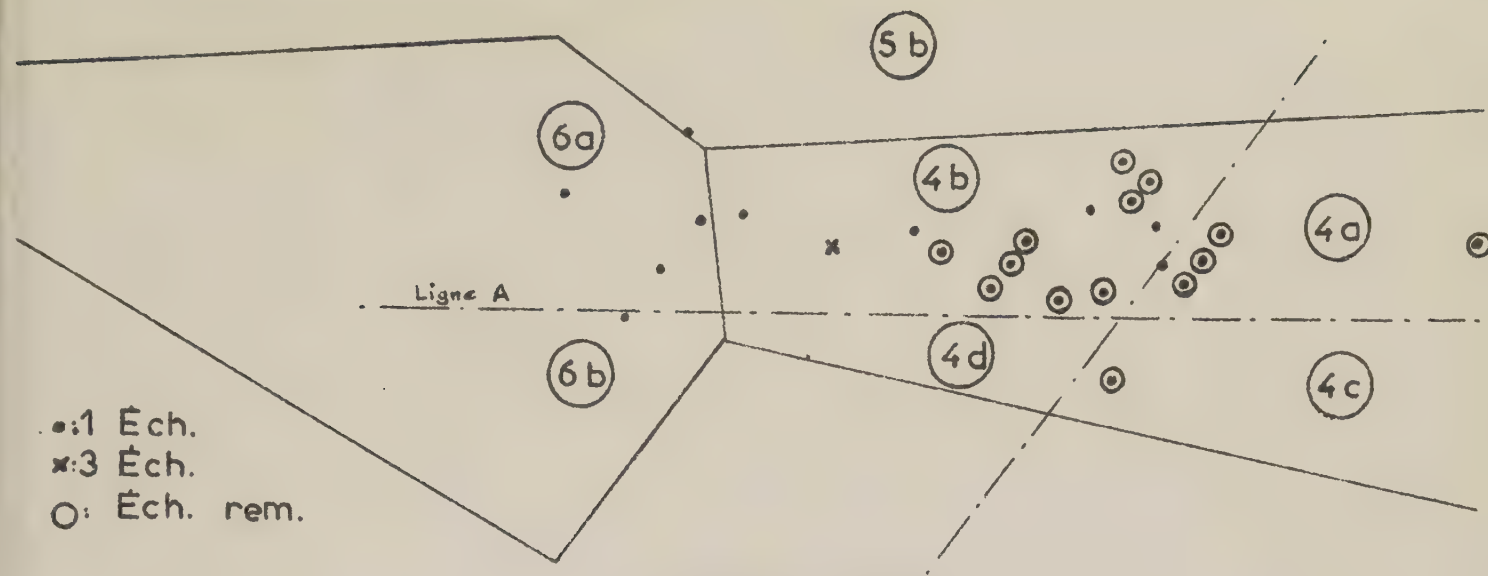
a) Le diagramme d'Hogentogler délimite parfaitement l'ensemble du groupe pour les valeurs de Wl $\geq$ 40, que l'abaque de plasticité vient cloisonner en isolant certaines valeurs de ce premier groupe.

b) L'abaque de plasticité lève l'indétermination pour les valeurs inférieures de Wl $<$ 40.

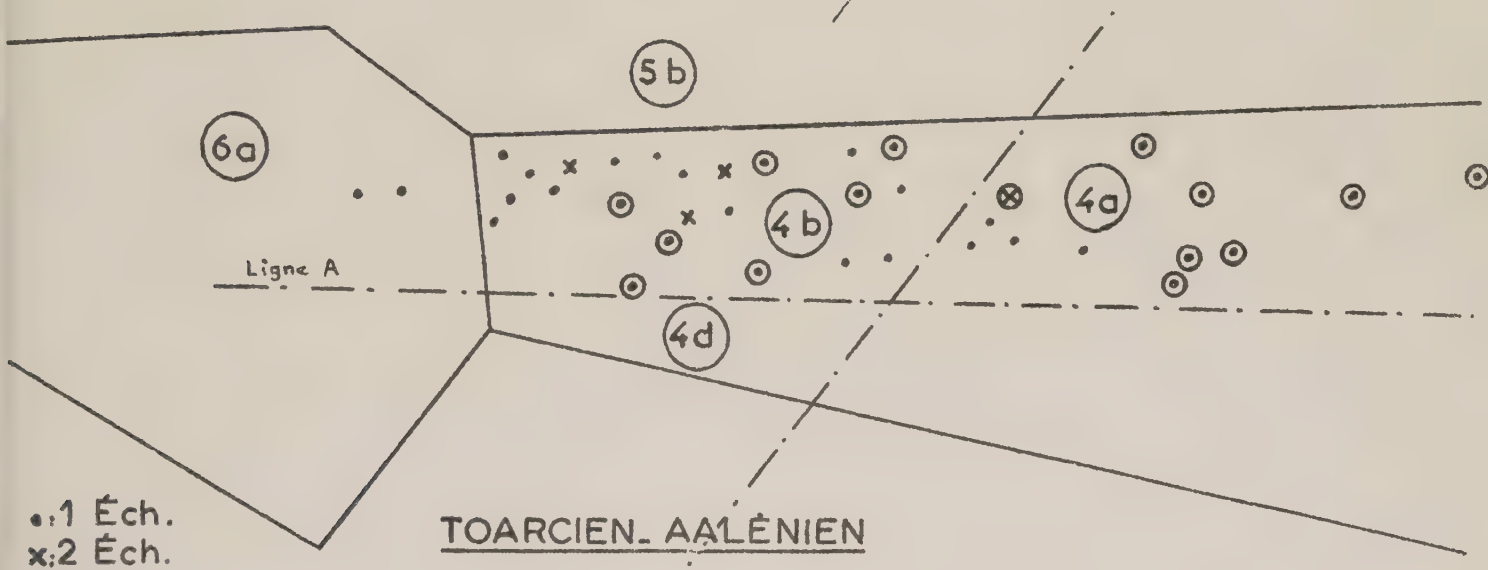
En utilisant les deux abaques combinées, nous avons établi une classification qui concerne uniquement les sols cohérents et s'adapte aux sédiments marins que nous étudions. Elle révèle 6 zones dont les deux premières non mentionnées, sont relatives aux sols non cohérents et sortent du cadre de cette étude.

Zone	valeur relative de Wl	Sans zone	Description des échantillons
3	50 $<$ Wl	3a	limon inorganique à fortes plasticité et compressibilité.
	Wl $\leq$ 50	3b	Limon inorganique à moyenne plasticité et compressibilité.
4	50 $\leq$ Wl	4a	Argile inorganique d'assez forte plasticité
	Wl $<$ 50	4b	Argile inorganique moyennement plastique
	50 $<$ Wl	4c	Argile organique et A.silteuse d'assez forte plasticité
	Wl $\leq$ 50	4d	Argile organique et A.silteuse à moyenne plasticité
5	50 $<$ Wl	5a	Argile inorganique de très forte plasticité
	Wl $<$ 50	5b	Argile silteuse inorganique de forte plasticité
6	Wl $<$ 50	6a	Argile silteuse inorganique de faible plasticité
	Wl $\leq$ 50	6b	Silts argileux et limons à faibles plasticité et compressibilité.

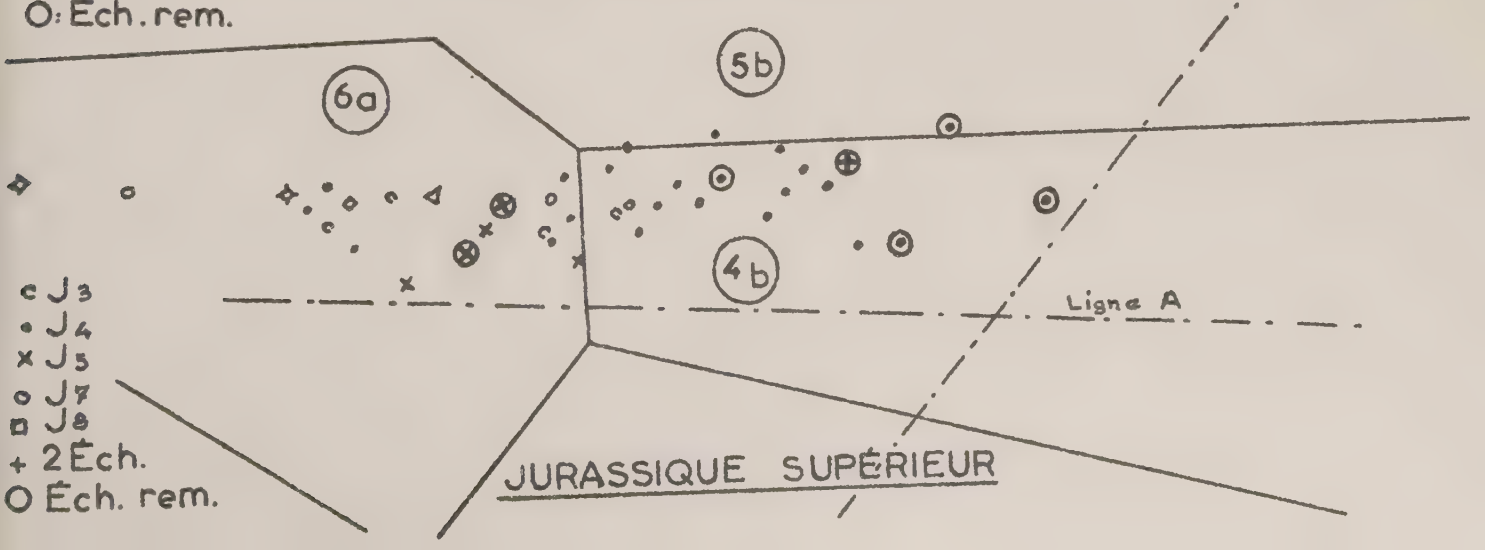
-- DIAGRAMME W.L./I.P. --



CHARMOUTHIEN



TOARCIEN-AALÉNIEN



JURASSIQUE SUPÉRIEUR

C - ESSAIS OEDOMETRIQUES

I°) Introduction

Dans le cadre de notre travail, qui, ne le perdons pas de vue est un essai de corrélations entre la géologie et la géotechnique, l'essai mécanique à l'oedomètre prend une importance considérable.

En effet, outre son intérêt pratique : connaissance du facteur de compressibilité permettant de déterminer les tassements susceptibles de se produire sous une charge donnée, il devrait permettre de déterminer la pression de consolidation, c'est-à-dire, donner des indications sur l'épaisseur des terrains qui avant tout commencement d'érosion et dans l'hypothèse, où aucun remaniement orogénique ne s'est intercalé, frettaient la couche considérée.

2°) Théorie

Dans le terrain en place, les tassements sont très longs pour l'argile du fait de l'eau interstitielle qui ne peut s'évaporer que fort lentement. D'autre part, un volume quelconque de matériau, considéré en place, ne peut généralement, subir de déformation latérale lorsqu'on est éloigné de l'équilibre limite, du fait des pressions et des frottements exercés par la masse des éléments qui l'enferme.

L'oedomètre, appareil mis au point par M. TERZAGHI, répond à ces conditions : possibilité d'écoulement de l'eau à travers l'échantillon, grâce à deux disques poreux en tête et au pied, et invariabilité des dimensions transversales de l'éprouvette essayée.

Les résultats sont exprimés sous forme graphique.
On porte en ordonnée les rapports enfoncement sur hauteur initiale de l'échantillon, soit $\frac{dh}{h}$, en se servant d'une échelle arithmétique. La pression P, appliquée, est portée en abcisse en se servant d'une échelle logarithmique. La courbe obtenue est $\frac{dh}{h}$, log, P.

3°) Hypothèse sur la pression de consolidation d'un sédiment.

D'après les auteurs classiques, les courbes de changement et la compressibilité d'un sol dépendant, non seulement de l'état initial du sol, mais des opérations qu'il a subies antérieurement, disons de son passé mécanique.

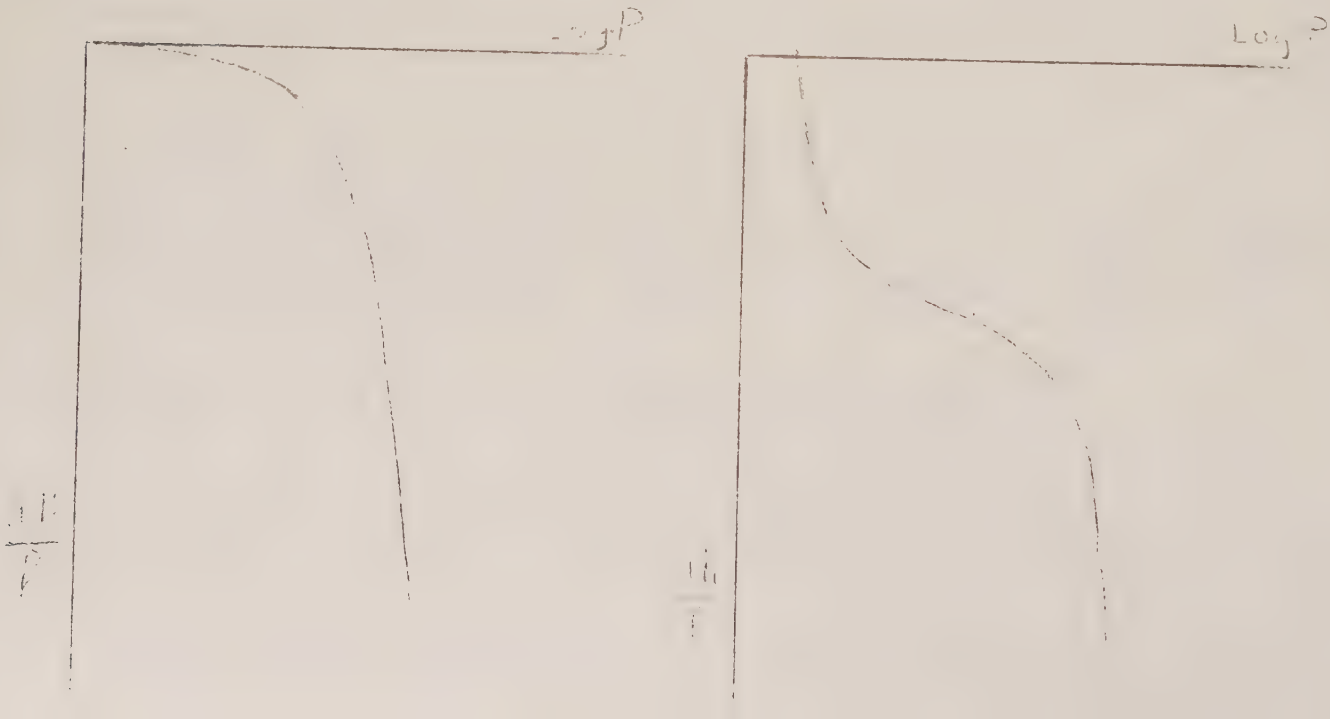
C'est-à-dire que dans les résultats de notre essai,

devraient être "inscrits" : les facteurs de sédimentation d'une argile et l'histoire géologique postérieure à celle-ci, il n'en a rien été pour les sédiments étudiés et ce, probablement pour plusieurs raisons.

La principale difficulté vient de la tendance à gonfler, de nos sédiments marneux; à ce sujet nous proposons deux hypothèses : cela peut s'expliquer simplement du fait que ces matériaux ont été soumis au cours des siècles à une pression supérieure des terres sus-jacentes ultérieurement érrodées et accessoirement par une dessication sous l'effet d'une exposition momentanée à l'air.

En fait le gonflement sensu stricto n'est pas certain durant l'expérience. Les sols présentant de tels phénomènes doivent avoir une texture telle, qu'ils n'acquièrent pas leur état d'équilibre sous les pressions de consolidation, de telle sorte qu'ils regonflent quand la pression est annulée et qu'une eau additionnelle peut éventuellement agir. Dans ce cas, l'eau apportée ne ferait pas gonfler les argiles à proprement parler, mais serait susceptible de faciliter la détente en jouant le rôle de lubrifiant entre les particules.

C'est ainsi, que dans certains essais, la courbe de chargement avait l'allure générale représentée sur la figure de gauche, au lieu de celle, normale, sur le premier schéma et indiquait que le piston de l'oedomètre a tendance a remonter après un premier chargement.



Ces courbes de consolidation doivent donner une idée de la compression que subira la couche précomprimée sous le poids d'un immeuble.

Si on effectue un tel essai de consolidation sur un échantillon intact d'un de nos sédiments précomprimés et qu'on le traduit par une telle courbe, l'expérience montre que la compression de l'argile, calculée est jusqu'à plus de cinq fois plus grande que la compression du sédiment en place. Il est bien évident, que l'histoire du chargement d'une argile est un facteur dont l'importance pratique est considérable. On peut toujours évaluer avec une précision suffisante la pression de consolidation maximum en s'appuyant sur des données géologiques et morphologiques; quand il n'est pas possible de recueillir de telles données avec suffisamment de précision ou quand la précompression est due au poids d'une couverture glaciaire qui a fondu sans laisser de traces de son épaisseur, une évaluation géologique est tout à fait incertaine. Dans ce cas, on ne dispose plus que des résultats des essais de laboratoire pour se faire une idée de la valeur du Pc du sédiment. L'application de la pression p, se fait à l'échelle des temps géologiques, que les quelques jours employés au laboratoire ne saurait rendre équivalente. Or, la vitesse de chargement peut avoir une influence considérable sur la pression correspondante.

D'autre part, M. GARD (1950), étudiant les schistes bitumineux de Franche-Comté et consécutivement à l'observation des coquilles applaties sur les deux faces en forme de galets, concluait que le dépôt de ces sédiments s'était formé très rapidement en couches minces, se consolidant presque instantanément.

Dans ce cas, au moins, la consolidation du sédiment serait indépendante de la masse susjacente déposée ultérieurement.

4°) Expression des Résultats

Huit essais ont été effectués sur des échantillons de la série jurassique de la région de Besançon. Ces essais ont été pratiqués de différentes manières pour tenter de résoudre le problème du gonflement.

Nous avons exprimé pour chaque échantillon les modules oedométriques E, définis en un point par la relation :

$$dP = E \frac{dh}{h}$$

ou dP = augmentation de pression

$\frac{dh}{h}$ = rapport de l'enfoncement sur la hauteur totale de l'échantillon

et la pression de consolidation Pc.

Nous avons confronté ces résultats à onze essais effectués dans le cadre de l'étude des H.L.M., dans la banlieue Nord de Bourges (Bourges-Chancellerie 222 et 555 logements LA BEARNAISE I964), concernant des marnes séquaniennes et kimméridgiennes d'une manière générale : feuilletées, compactes, grises ou beiges.

Le tout est exprimé dans le tableau ci-après.

REF	BESANCON	$E_{0,5-1}$	E_{2-1}	E_{4-2}	E_{8-4}	Pc /kg cm^2
9	Argilite noire organique L4	24	29	4I	79	I,4
23	Argilite brune L4		9	64	99	
76	Marne bariolée L5/6		44	73	II6	I,6
45	Marne micacée grise L6		52	69	90	2,6
92	Shale marn. mic. rouille L6		I4	54	I00	I,7
I0	Marne panachée J4	33	38	55	II5	I,4
I25	Shale marneux gris compact				250	
II8	Shale marneux sabl. gris J5	I0	89	I47	2I7	I,7
	BOURGES - Séquanien et Kimméridgien inférieur					
B3	Marne grise compacte	63	78	I32	I73	I,5
B8	Marne grise compacte	39	57	86	I35	I,4
B9	Marne grise compacte	48	54	I00	I39	I,4
BI3	Marne grise compacte	78	78	II9	I43	2,2
BI5	Marne grise compacte	48	69	II9	I78	I,5
B I8	Marne jaunâtre	33	52	93	I32	I,2
BI9	Marne jaunâtre	78	60	96	I6I	
B25	Marne blanchâtre	52	48	69	I08	
B29	Marne blanchâtre	70	74	I09	I72	
B35	Marne grise	78	I04	I25	2I7	
B36	Marne grise	57	57	I00	I6I	

L'essai a été conduit de la même façon sur chaque échantillon, sauf pour l'éch. 9, sur lequel la pression s'est effectuée perpendiculairement à la stratification et l'éch. 125, pour lequel l'essai a commencé après saturation sous 4 kgs/cm2 de pression.

Les résultats sont équivalents dans tous les cas et on obtient : $1,2 < Pc < 2,6$. Or, pour de telles marnes, des essais effectués avec des oedomètres spéciaux ont donné des Pc, de l'ordre de 35 kgs/cm2 et plus, (CAQUOT et KERISEL).

5°) Hypothèses consécutives aux résultats des essais.

Les chiffres obtenus sont donc décevants, on peut leur donner plusieurs interprétations :

a) La perturbation est dûe pour une part, à la vitesse de la consolidation excessive, comme nous l'avons vu, par rapport au changement progressif ayant eu cours durant les cycles de sédimentation.

b) A un drainage deffectueux possible, pour des marnes particulièrement compactes.

c) Au dérangement des matériaux phylliteux, lors de la saturation : les particules le plus souvent plates, sont brusquement désorganisées les unes par rapport aux autres, ce qui entraine une suppression des interactions moléculaires, puis le gonflement, et lors de la consolidation les particules ne retrouvent guère leur place intitiale.

d) On peut également voir là une preuve que la cohésion des argiles sédimentaires précomprimées ne serait pas uniquement dûe aux terrains la compressant primitivement, mais aussi au mode de cohésion spécifique aux sédiments marins. Cette cohésion n'est fonction, que de la forme et de la grandeur des particules. Au cours de la sédimentation, les particules qui tombent au fond de l'aire marine ont une vitesse limite, fonction de leur densité, de leur diamètre et sont entourées d'une couche liquide adsorbée superficiellement. Lorsque deux couches adsorbées exercent l'une sur l'autre un effet d'échanges moléculaires, les grains adhèrent les uns aux autres.

Cette cohésion dite "vraie", augmente sensiblement avec la charge à laquelle est soumise la masse du sédiment, par suite de l'augmentation du nombre des points de contacts entre les particules proportionnelles à la pression des dépôts sus-jacents.

Elle peut aussi masquer certaines propriétés spécifiques du sédiment considéré. Ceci est d'autant plus vrai, que ces dépôts sédimentaires ont pu être soumis à des alternances

de chargement et de déchargement, issus des émersions , érosions, oscillations, qui provoquent des regroupements irréversibles des grains. Il ne faut pas non plus perdre de vue "l'enrichissement" de la cohésion dûe à des cristallisations secondaires signalées, par M. BUISSON (I942). Le sédiment dans ces conditions, devient relativement dense, et par conséquent très cohérent.

Le regroupement des particules étant irréversible, la densité de la marne après déchargement restera plus élevée qu'avant le chargement. La cohésion du matériau sera, par voie de conséquence, renforcée à chaque cycle de chargement, même si le chargement le plus récent, est inférieur aux frettages antérieurs déjà subis.

Ceci expliquerait, le peu de différence constatée sur la pression de consolidation de deux sédiments,l'un tertiaire, l'autre jurassique et dans un autre ordre d'idée, les résultats pour le moins inattendus, constatés pour de tels sédiments.

o

oO Oo

TROISIEME PARTIE

C O N S E Q U E N C E S D E S E T U D E S P R E C E D E N T E S

I- COMPORTEMENT MECANIQUE DES SEDIMENTS MARNEUX

Ce travail n'aurait pas été complet si nous n'avions pas étudié les sédiments marneux jurassiques, en tant que sol de fondation.

I°) Les marnes dessinent une topographie horizontale. Avec ce profil, les marnes jurassiques n'opposent pas de difficultés particulières à l'ingénieur. En effet, l'imperméabilité de ces matériaux, leur permet d'offrir dès la profondeur de deux mètres, des compacité et cohésion excellentes, permettant de fonder divers types de constructions par l'intermédiaire de solutions simples, au prix de revient très moyen, compte tenu des coefficients de sécurité et étant entendu que les conditions de tassements différentiels sont admissibles. Ainsi, au hasard des projets qui nous ont été soumis, nous avons pu relever :

a) A Besançon, un batiment (A_2) de type tour H.L.M., avec sous-sol, élevé dans le quartier de Fontaine-Argent dans le cadre de l'opération "Clairs-Soleils", a été fondé sur semelles filantes en béton armé. La couche d'assise choisie était la zone très compacte des marnes à Cardioceras cordatum.

La contrainte admissible envisagée est de 3kgs/cm2, choisie avec une large marge de sécurité, compte tenu de la présence possible en profondeur, de couches de marnes plus tendres (Etude SOCOTEC I962).

b) A Bourges, une serie de batiments de type H.L.M., ont été bâtis sur le Séquanien supérieur, représenté par les marnes à rognons calcaires à Pteroceras ponti, marnes tout à fait analogues à celles du Jurassique supérieur de la région de Besançon.

Nous présentons les résultats comme suit :

TYPE de BATIMENT	ENCASTREMENT EN M.	MODE DE FONDATION	TAUX DE TRAVAIL ADMISSIBLE
IO niveaux	3,50 m	semelles filantes de 2,00m.	1,8 Kg/cm2
4 niveaux	3,50 m	semelles filantes de 0,80m.	2 Kgs/cm2

Une autre série de bâtiments était posée, soit sur le Séquanien, soit sur les marnes feuilletées à Exogyra virgula, du Kimméridgien. Ces bâtiments de 5 niveaux ont été fondés sur des marnes par l'intermédiaire de semelles de 0,80m., de large encastrées à 2,50m., de profondeur; dans le cas le plus défavorable, le taux de travail admissible est de 2,5kgs/cm2.

Aucune précaution spéciale n'a été prise : simplement, les semelles sont rigidifiées et légèrement enterrées pour éviter les remaniements inévitables de la zone superficielle, et la partie inférieure des bâtiments est rigidifiée en traitant les murs du sous-sol en béton banché armé, (Etude Sté BEARNAISE).

Pour lutter contre les tassements différentiels résultant de gonflements ou de contractions de la marne suivant les saisons, des joints de rupture ont été réalisés dans les profils du bâtiment.

c) Dans les mêmes marnes séquaniennes de Bourges, la construction d'un hangar dont les descentes de charges sont transmises au sol par l'intermédiaire de poteaux isolés, dans ce cas une solution sur semelles superficielles n'est pas recommandable et des puits courts ou massifs cubiques ont été réalisés transmettant au sol des taux de travail compris entre 2,5 et 5kgs/cm2, dans cette solution les efforts horizontaux peuvent être absorbés par butée, sans déplacements excessifs, (Etude L. MENARD).

2°) Constructions sur talus.

Là, le problème est beaucoup plus complexe, car un terrain marneux en pente est sujet à une érosion intense, provoquée comme nous l'avons vu, par alternances de gel, de pluie et de dessication, qui entrainent de multiples glissements superficiels caractérisés par les cicatrices d'arrachement qu'ils dessinent dans le paysage.

On a remarqué à ce sujet, que des parois de fouil-

les rigoureusement verticales dans les marnes compactes pouvaient résister plusieurs mois à l'érosion (chantier de Clairs-Soleils), alors qu'une pente devient rapidement instable, du fait probablement, de la plus grande emprise qu'elle offre aux agents atmosphériques.

Ces terrains en phase de glissement offrent de faibles caractéristiques mécaniques et par conséquent s'opposent le plus souvent à l'adoption des solutions simples de fondation, comme les semelles filantes.

a) Fondations sur puits.

Dans le cas de glissements superficiels de faible amplitude, des puits de grande section, creusés à la main jusqu'aux couches saines constituent une solution particulièrement économique, bien qu'on se heurte à des difficultés de mise en oeuvre, on peut cependant espérer que dans de tels sols, les venues d'eau faibles, peuvent facilement être éliminées par pompage.

En vue de réduire les tassements différentiels, le taux de travail est réduit $< 1 kg/cm^2$ et on prévoit des longrines de rigidification entre les puits armés en tête. Elles doivent avoir au minimum une section de $1 m^2$ et être sérieusement armées, puis coulées en pleine fouille. Outre le prix de revient intéressant, le principal intérêt de cette solution résulte dans le fait que les massifs s'opposeront efficacement aux efforts de poussée des terres incluses dans le glissement, sans pour cela conduire à des efforts de renversement importants.

La réalisation d'un tel projet, doit évidemment s'effectuer en période sèche, le blindage du puits restant nécessaire dans la plupart des cas.

b) Fondations sur pieux.

Dans le cas, d'importantes descentes de charges (H.L.M., bâtiments industriels), on peut être amené à envisager cette solution, Dans un terrain en phase de glissement, pour que le pieu travaille le plus près de sa force portante nominale, on a intérêt à adopter des pieux de forte section, ($\emptyset \geq 1 m$) et forés. Ces pieux sont ancrés dans les marnes compactes et armés en tête sur plusieurs mètres. Pour répartir les charges uniformément et éviter les tassements différentiels, ils sont comme pour les puits, reliés rigidement au niveau du dernier plancher par de fortes longrines armées, jouant le rôle de tirants.

c) Fondations sur radiers.

Au cas où le glissement est de grande amplitude, outre la difficulté de mise en oeuvre des engins de battage sur de telles pentes, on s'expose avec les pieux, à de graves inconvénients, tel leur cisaillement pur et simple aux niveaux des surfaces de glissement.

Dans ce cas, la solution d'une fondation sur radier est la plus satisfaisante à condition, qu'il s'agisse d'un radier armé, nervuré, ou mieux, raidi par des refends continus d'une façade à l'autre et d'un pignon à l'autre, et traités en béton armé.

Le radier est prévu avec une surlargeur vers la partie aval du terrain pour limiter le basculement éventuel du bâtiment dans le sens de la pente.

La solution sur radier, dans des cas particulièrement délicats, peut être améliorée en radier brossé à pieux courts expansés.

3°) Stabilisation d'un glissement à l'ouverture des fouilles.

D'importantes précautions doivent être prises à l'ouverture des fouilles, quand on se trouve en présence d'un glissement exigeant une solution de fondation sur radier, en sous-sol.

Face au glissement de terrain potentiel, il faut maintenir l'équilibre de la pente. Pour cela on conserve les forces en présence du bâtiment en compensant le poids mort du bâtiment par un poids équivalent de terre excavée. Du côté amont du futur bâtiment, l'exécution des fouilles est réalisée en portées alternées. On coule la portion de radier correspondante et on monte les murs armés que l'on contrebute avant d'entamer les tranches adjacentes. L'élévation du bâtiment entraînant une surcharge ponctuelle qui peut remettre en mouvement le glissement, il est souhaitable, au fur et à mesure de l'ouverture des fouilles, de mettre en place :

- des éperons de caillasses jouant le rôle simultané de drains et de contreforts,
- un massif de sables et graviers en bas de pente, à la tête du glissement, pouvant servir de contrepoids pour les masses instables susjacentes,
- Un drainage est toujours efficace.

II- COMPARAISON DES ETUDES GEOLOGIQUES ET GEOTECHNIQUES

Dans le cadre de l'étude géotechnique nous avons pu isoler des familles et sous-familles dans la masse monolithique des marnes du Lias et du Jurassique supérieur.

La première chose qui frappe quand on confronte les résultats des études géologiques et géotechniques c'est, la parfaite homogénéité des résultats : conditions de sédimentation et description macroscopique d'une part et caractéristiques physiques et mécaniques de l'autre.

Les données géotechniques ont cependant mis en évidence une première distinction nette entre les marnes du Lias et celles du Jurassique supérieur, puis à l'intérieur de chaque groupe les échantillons remaniés ont montré des valeurs de limite d'Atterberg nettement plus élevées, ainsi que des courbes granulométriques nettement différenciées.

Par ailleurs, des marnes de l'Oxfordien échantillonnées dans des régions éloignées l'une de l'autre (Besançon et Belfort), ont présenté des caractéristiques physiques et mécaniques tout à fait équivalentes. Ceci s'est également révélé juste, pour des marnes du Séquanien-Kimméridgien, prélevées soit à Besançon, soit à Bourges. Dans cette dernière localité, des limites mesurées sur une vingtaine d'échantillons ont révélé des valeurs très moyennes, ($34 < Wl < 47$ et $16 < Wp < 24$, Sté BEARNAISE), analogues à celles mesurées sur des matériaux de même âge à Besançon.

Les conditions de dépôt ayant été très voisines pour l'ensemble des sédiments situés à l'Est du Bassin Parisien, il apparaît que des formations ayant même histoire géologique, possèdent des caractéristiques physiques voisines. Inversement, des échantillons du Lias prélevés d'une part, à Besançon, de l'autre aux environs de Montpellier, ont révélé des caractères physiques différents, parallèlement aux modes de sédimentation.

O

oO Oo

C O N C L U S I O N

Plus qu'une démonstration à caractère exhaustif, nous avons établi dans ces pages une méthode de travail, utile aussi bien au chercheur dans le domaine géologique, qu'à l'ingénieur dans le domaine géotechnique.

En effet, d'une base de travail portant sur l'étude des corrélations qui pouvaient exister entre les caractères géologiques et les caractéristiques géotechniques des marnes aux alentours de Besançon, nous avons été amené à mettre en évidence une méthode de classification de ces sédiments, méthode que l'on peut étendre à l'ensemble des matériaux meubles et cohérents.

Par la multiplication de telles études, il semble que l'on puisse aboutir à des résultats intéressant :

I°) Le domaine géologique

La détermination des caractéristiques physico-chimiques d'un groupe de sédiments permet d'inscrire dans son contexte géologique, un sédiment quelconque extrait d'un ensemble donné, et donne un grand nombre de renseignements à partir du traitement statistique des résultats obtenus.

Nous citerons entre autres :

- Des indications sur le degré de remaniements des matériaux.

- Des précisions sur le processus de dépôt et de consolidation des sédiments.

- D'orienter les recherches sur la nature de l'argile.

2°) Le point de vue de l'ingénieur.

L'intérêt est évident : la classification d'un matériau à partir de données géologiques et d'essais simples, donc peu couteux et ne nécessitant pas le prélèvement d'échantillons intacts, ce qui est le plus souvent illusoire quand un essai mécanique est prévu, permet au géotechnicien d'entamer logiquement l'étude d'un sol quelconque.

Ultérieurement, par la multiplication de telles études, il semble que l'on puisse :

- D'une part, préciser la place de sédiments dont l'origine est très souvent floue, dans leur contexte géologique.

- D'autre part, étendre l'emploi d'une méthode simple et rationnelle de classification des sédiments, qui permette au technicien d'entreprendre aisément l'étude des sols de fondation.

-=oOo=-

B I B L I O G R A P H I E

-----oOo-----

OUVRAGES CONSULTES

ABRARD R. - I947 - Le détroit franco-germain C.R.Ac Sc t 225 p. 1014.

ALLEN - I942 - Classification of soils and control procedures used in construction of embankments - Public Roads V 22 p. 263-282

ALIBERTI G. - I956 - Géophysique et mécanique des sols dans leurs applications pratiques - Dunod p. 159.

ATTERBERG A. - I9II - Die Plastizität der tone - Interp. Mitteil bodenhunde V.I, p. 4-37.

AUBERT D. - I947 - Rapport entre les facies des terrains secondaires et les plissements jurassiens. Bull Lab. Géol. Univ. Lausanne n° 84.

BANNISTER M.F.A. - I95I - Les espèces minérales trouvées dans les argiles et leur relation avec la géologie. Groupe français des Argiles, Tome IV, p. 2-26.

BARBIER G. - I935 - Influence des colloïdes huniques sur certaines propriétés physiques et chiniques des terres argileuses - Ann. Agrenoniques, p. 765-780.

BAVER L.D. - I930 - The Atterberg Consistency constants : Factors affecting their values and a new concept of their significance. J.Am. Soc. Agren. p. 935-948.

BAVER L.D. et WINTERKORN H.F. - I935 - Sorption of liquids by soil colloïds - II Soil Sci, 40, p. 403-4I9.

BERTHOIS L. - I958 - Technique de l'analyse granulométrique - "Les cours de la Sorbonne". C.D.U., p. 64.

BERTHOIS L. - I962 - Etude du comportenent hydraulique du nica. - Vol. 1. n° 1. Sedimentology, p. 40-49.

BONNEINFANT J.L. - I944 - Les applications routières des sols cohérents. Annales des P. et C., n° VI p. 553.

- - I945 - n° I à VI.

BONTE A. - I942 a - Sur le Toarcien des Mercureaux - B.S.H.N.D. n° 50, p. 2I-23.

- - I942 b - Observations géologiques sur la région Miserey à Chatillon-le-Duc - B.S.H.N.D. n° 50, p. 10-20.

- - I943 - La zone des Avants-Monts entre Chatillon-le-Duc et Miserey - Fouille de Besançon au 1/50.000e, B.S.C.G.F., n° 212 t XLIV, p. I39-I65.

- - I945 - Les horizons du Callovien dans les environs de Besançon - C.R.S. S.G.F., p. I54.

- - I946 - Fouille de Besançon au 1/50.000e. La tranchée de Miserey - Extrait du bull. de la carte géol. de F. t 46, n° 22I p. I07 - I22.

BORDAS M.D. et HUGUET Mme F. et MEYNADIER Y. - I958 - Une mise au point de la technique des analyses granulométriques en grande série - Bull. Ass. Franc. Etude du Sol, p. I64 - I70.

BOURCART J. - I94I - Essai d'une classification raisonnée des matériaux meubles - B.S. g.f. XI, p. II7-I53.

=-=-= - I96I - Mémoires du B.R.G.M., n° 4, colloque sur le Lias français, Chambéry I960, p. 862 et 1 pochette annexe.

BOUYOUCOS G.J. - I937 - A sensitive Hydrometer for determining small amounts of clay or colloïds in soils - Soil Sci p. 245-246.

BRAJNIKOV B., FRANCIS-BOEUF C. et ROMANOVSKY V. - I943 - Techniques d'études des sédiments et des eaux qui leur sont associées,- Actualités scientifiques et industrielles, n° 952, p. II0.

BUISSON M. - I942 - Essais de géotechnique - caractéristiques physiques et mécaniques des sols, Dunod Paris.

BULLE J., MARTIN J. et ROLLET M. - I96I - Esquisse géologique du faisceau bisontin entre Pugey, Arguel et Vorges, - B.S.H.N.D. n° 30 p. I0-20.

CAILLERE S. et HENIN S. - I956 - La classification des argiles - XXe Congrès Internat. Mexico, p. I-8.

- - I958 - Propositions pour normaliser la nomenclature des minéraux argileux - Bull. du G, Fr. des Argiles, IX, 4. p.76.

- I964 - Minéralogie des argiles - Masson p. 356.

CAILLEUX A. - I954 - Limites dimensionnelles et noms des fractions granulométriques - B. S G F , p. 643-646.

CAIRE A. - I955 a - Découverte d'un affleurement d'Argovien au Nord de Morre (région de Besançon), conséquences tectoniques - p. I3-2I.

- - I955 b - Remarques sur le système de fouilles de St Léonard près Besançon (Doubs) - An Sc Un Bes. Géol, fasc 3, p. 23-29.

- - I960 - I963 - Livre à la mémoire du Professeur Paul Fallot - Tome II : Problèmes de tectonique et de morphologie jurassiennes, p. I05-I58.

CAMBEFORT H. - I965 - Glissements de terrain - Sols Soils n° 15 T.IV.

CAROLL D. - I959 - Ion exchange in clays and other minerals - Géol. Soc. América Bull. V 70, p. 749-779.

CASAGRANDE A. - I932 - Research in the Atterberg limit of soils - Public Roads, Vl 13, p. I2I-130,136.

- - I932 - The structure of clay and its importance in foundation ingineering - Soc of C.E. XIX n° 4.

- - I947 - Classification and identification of soils - Proc A.S.C.E.,p. 783-8I0.

- - I949 - Notes on swceling characteristics of clays-hales - Harward Univ.

- I958 - Notes on the design of the liquid limit device - Géotechnique Vl. VIII, p. 84-9I.

CASTUCHE M.C. - I959 - La génèse des minéraux argileux - Revue des questions scientifiques, Janvier I959.

CAQUINEAU X. - I962 - Le Grand canal du Rhône au Rhin. Etude géologique des principaux ouvrages entre Bourogne, (Territoire de Belfort), et St Symphorien-sur-Saône, (Côte d'Or). Thèse de 3ème cycle, Fac. Sc. Besançon.

CAQUOT A. et KERISEL J. - I957 - Traité de mécanique du sol - Paris.

=-=-= Colloques Internationaux du C.N.R.S., 3-6 Juillet I96I - Génèse et synthèse des argiles n° I05, p.226.

=-=-= Compte-rendu de l'excursion de la Société Géologique de Belgique et de la Société belge de géologie dans le Jura - Ann. Soc. géol. de Belgique t.73, P.95-I20

CENTRE D'ETUDE ET DE RECHERCHES GEOTECHNIQUES - Définitions et essais géotechniques normaux - Bull n° 1, Paris.

CORROY G. - I927- Synchronisme des horizons jurassiques de l'Est du Bassin de Paris - Bull. Soc. Géol. France (4), T. XXVII, p. 95.

DE BEER E.E. - I943 - Possibilités techniques d'un laboratoire de géotechnique - Science et Industrie n° 6 et 7, Bruxelles.

DEBYSER J. - I957 - Note sur un procédé de préparation des plaques minces dans les sédiments fins actuels - R. Inst Franç. Pétrole, Vol. XII, n° 4, p. 489-492.

DELMAS T. et MONTLEAU Ph. de. - I957 - Méthode densimétrique d'analyse granulométrique - Bull. Assoc. Franç. pour l'étude du sol, n° 93, p. I06I-I07I.

DEMOLON A. et BASTISSE - I928 - Les colloïdes argileux et les suspensions des sols - C.R.Ac. Sc. t. I86, p. I646.

- - I952 - Dynamique du sol - Dunod.

DEPRAT J. - I900 - I90I - Esquisse stratigraphique des environs de Besançon B.S.H.N.D., nén. n° 2.

- - I904 - Sur le passage du Toarcien au Médio-Jurassique aux environs de Besançon et sur la valeur du terme Aalenien - B. Serv.Cent.Géol. F. IV, p. 679

DEBRISAY M. et TRILLAT J.J. - I930 - Recherches sur les suspensions argileuses - Revue générale des colloïdes n° 73, p.9.

DREYFUSS M. - I933 - Une méthode simple pour l'exécution des plaques minces de marnes - Bull. S.H.N.Doubs, n° 43.

- - I933 - Les schistes bitumineux du Toarcien de Franche-Conté - Congrès des Soc. savantes de Franche-Conté à Lure et B.S.H.N., Doubs n° 43, p. 46-48 - I934 -

- - I934 - Méthodes pour la séparation argileuse des roches sédimentaires - C.R.Ac.Sc. t. 199, p. I63I.

- - I934 - Problèmes posés par les minéraux argileux - B.Soc.H.N.Doubs, n° 44, p. 38-40.

- - I935 - Etudes sur les sédiments argileux et argilo-calcaires - Les marnes du Lias de Franche-Conté, B.S. H.N.Doubs n° 45, mémoire séparé, p.92.

- - I938 - Etudes sur les sédiments argileux et argilo-calcaires - Marnes et marno-calcaires de l'oolithe franc-comtoise, B.S.Hist.Nat.Doubs, n° 48, p. 5I-82.

- - I95Ia- Les lacunes dans le Callovien et l'Oxfordien du Jura Occidental, sont-elles dues aux courants de marée - C.R.S.S., G.F., p. 98 - I00.

- - I95Ib - Réunion extraordinaire de la S.G.F., dans le Jura - B.S.G.F., p. 777-785.

- - I953 - Quelques caractères de la sédimentation du Jurassique supérieur à l'Est de la France, déduits des représentations graphiques - C.R.Ac.Sc., t.236, p.396.

- - I954 - Le Jura dans les mers du jurassique supérieur- Essai sur la sédimentation et la paléogéographie dans leurs rapports avec les déformations, mémoires de la S.G.de F. Nouvelle série T.XXXIII, fasc. 1, Mém.n° 69, p. 62.

- - I956 - Excursions géologiques : La Chapelle-des-Buis - Bull. bimestriel de la soc. d'H.N.Doubs n° II.

- - I956 - Circulation sous-cutanée et glissements actifs, agents d'érosion des couches marneuses du Jura bisontin - Ann. Sc. de l'Un. de Besanc. Géol. Fasc. 4, p. 3-5.

- - I960 - Quelques problèmes de fondations à Besançon - C.R. Som. Sé. Soc. Géol. Fr., p. 2I3, com. orales.

DREYFUSS M. et GLANGEAUD L. - I950 - La Vallée du Doubs et l'évolution morphotectonique de la région bisontine - Ann.Sc.Univ. de Besançon, t. 5.

DREYFUSS M., THEOBALD N., et THIEBAUT J. - I942 - Vue d'ensenble sur le Jura Franc-comtois et la retombée méridionale des Vosges - An.Sc. de l'Univ. de Besanç. Géologie, fasc. I6, p. 93-II2.

DUCHAUFOUR P. - I956 - Pédologie - Ec. Nat. des Eaux et Forêts, Nancy.

EDELMAN C.H. - I947 - Relations entre les propriétés et la structure de quelques minéraux argileux - Revue "Verre et silicates industriels", T. XII, n° 6, p. 4.

EVRARD P. - I947 - Session extraordinaire : Examen du faisceau bisontin, de sa stratigraphie et de sa tectonique. Soc. Géol. de Belgique dans le Jura - Bull.Soc.Géol. de Belgique, t.73, p. 85-I08.

GIBSON R.E. - I953 - Expérimental détermination of the true cohesion and true angle of internal friction in clays - proc. Thi d Intern. conf. soil mèchànies I, p. I26-I30.

GIRARDOT A. - I922 - Géologie stratigraphique de la Franche-Conté septentrionale - Librairie centrale, Besançon.

GENNEVAUX M. et ROMAN F. - I9I2 - Etude sur les terrains jurassiques de la région du Pic St Loup (Hérault).

GLANGEAUD L. et DREYFUSS M. - I949 - Aperçu sur la géologie du Jura Franc-comtois - Livret guide, Exc.géol. interuniversitaire.

- et collaborateurs - I95I - Réunion extraordinaire de la soc. géol. de France dans le Jura franco-suisse - Bull. soc. géol. France, t.I, p. 763-872.

GRIM R.E. - I950 - Some Fundamental Factors influencing the properties of soils materials - Proc. second. Intern. conf. on soil mechanics and foundation engineering, vol. 3, p. 8-I2 - Rotterdam.

- - I962 - Applied clay mineralogy - Mc. Grawhill Book company, I.N.C., p. 422, New-York, London, Toronto.

GRIM R.E. et ALLAWAY W.H. et CUTHBERT F.L. - I947 - Reaction of different clay minerals with organic cations - J.Am. Ceram. Soc. 30, p. I37-I42.

GROUPE FRANCAIS DES ARGILES - I95I - C.Rs des Réunions d'études - Editions du C.N.R.S.

HALLAM A. - I960 - Origine des cycles mineurs de sédimentation carbonatée dans le Lias - Pré-tirage, Colloque sur le Lias, Chambéry, p. 6.

HAUSER E.A. - I945 - Colloïd chimistry of clays, chen.Rev. vol. 37 p. 287 - 32I.

HOGENTOGLER C.A. - I937 - Engineering properties of soils - Mc. Graw-Hill book company, Inc, N.Y.

HOLTZ W.G. et GIBBS H.J. - I953 - Engineering perperties of expansive clays - Proc. am. soc. civil engrs 79.

JEANNETTE - I959 - La génèse des argiles et leur place dans l'évolution sédimentaire - Mines et géologie, n° 6, 2ème trimestre I959. p. 2I-29 - Bull. Dir. Mines et Géol. du Maroc.

JOLY H. - I9I4 - Etudes sur les marnes à fossiles pyriteux du Callovien et de l'Oxfordien dans l'Est de la France - B.S.G.F., t. XIX, p. 4II-420.

KIEFER Ch. - I95I - Contribution à nos connaissances sur les minéraux phylliteux - C.R. Groupe français des argiles, T. IV, p. 76-88.

KULBICKI G. et MILLOT G. - I959 - Appoint des minéraux argileux interstratifiés à la géologie des roches sédimentaires - Bull. Gr. Fr. des argiles, T.XI, p. 47-52.

LEGGET R.F. - I962 - Geology and engieneering - Mc. Graw-Hill book company, I.N.C. N.Y.

LOMBARD A. - I953 - Les rythmes sédimentaires et la sédimentation générale - Rev. Inst. Fr. Pétrole n° 8 spl, p. 9-45.

- - I956 - Géologie sédimentaire - Les séries marines, Masson, p. 722.

LOMTADZE V.D. - I957 - Méthodes d'étude des propriétés physico-mécaniques des terrains sableux et argileux - Gesheolizdat, Moscou (nt).

MARTIN R.T. et LAMBE T.W. - I957 - Soil composition and its influence on the engineering behawior of fine grained soils clays minerals - Bull. 3, p. I37-I50.

MATTAUER M. - I955 - quelques précisions sur l'évolution morphotectonique du faisceau bisontin - Géol. fasc. 3, p. 3I-36.

MAUREL P. - I959 - Etude minéralogique de quelques marnes oxfordiennes - Bull. soc. fr. min. crist., p. 276-284.

MAYER A. - I959 - Précis de mécanique des sols - Collection Armand Colin n° 33I, p. 2I6.

MENARD L. - I963 - Tendances nouvelles en mécaniques des sols - Bull. de l'A.I.A., n° 1, Bruxelles.

MERIAUX S. - I957 - L'analyse granulométrique par densimétrie - Bull. Associat. Franç. pour l'étude des sols, n° 90, p. 928-94I.

MIELENZ R.C. et KING M.E. - I955 - Physical-chenical properties of and engincering performance of clays - Calif. Div. Mines, Bull. I69, p. I96-254.

MILLOT G. - I949 - Relations entre la constitution et la génèse des roches sédimentaires argileuses - Géol. appl. et prosp. min. T. II; n° 2-3-4, p. 352, I8 fig., I2 tabl., 7 pl.

- - I953 - Minéraux argileux et leurs relations avec la géologie, Colloque de l'Ass. Int. de Sédimentologie - Revue de l'Institut du Pétrole et annales des combustibles liquides, Vol. VIII, p. 75-86.

- - I957 - Sédimentologie - Des cycles sédimentaires et trois mode de sédimentation argileuse, C.R. As SC. t. 244, p. 25-36 - 2539.

- - I964 - Géologie des argiles - Masson p. 499.

MONEK G. - I964 - Contribution à l'étude des corrélations existant entre les caractéristiques géologiques et géotechniques d'une formation meuble - Thèse de 3ème cycle, Fac. Sc. Besançon.

OSTERBERG J.O. - I940 - A survey of the frost heawing problen - Civil Eng. Vol. I0, p. I00-I02.

PAUL R. - I963 - (Union Technique Interfédérale du Bâtiment et des Travaux Publics) - Les fondations de maisons individuelles, p. 60, Collection de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics.

PELTIER R. - I950 - Manuel du laboratoire routier - Dunod 2ème édition, p. 288.

PREECE E.F. - I947 - Géotechnics and géotechnical research - Proc. U.S. Highway Research Board 27, p. 384-4I6.

RIVIERE A. - I946a- Contribution à l'étude des sédiments argileux et argilo-marneux - B.S.G.F., 5ème série t. I6, p. 43.

- - I946b- Sur une méthode simplifiée de détermination des argiles - Applications aux bravaisites (illites) C.R.S. Soc. Géol. F., p. 246.

RIVIERE A. - I946c- Sur les argiles micacées (Illites) - C.R. Acad. Sc. Fr. 222, p. I445-I446.

- - I95I - Considérations générales sur la géologie des sédiments argileux - C.R. groupe F. des Argiles, T. IV (suite) p. 47-62.

- - I952a- Sur la représentation graphique de la granulométrie des sédiments meubles - B.S.G.F., 6ème série, T. II, Fasc. I-3, p. I45-I54.

- - I952b- Expression analytique générale de la granulométrie des sédiments meubles - Bull. Sc. Géol. Fr. 6ème série, T. II, fasc I-3, p. I53-I67.

- - I953 - Sur l'origine des argiles sédimentaires XIXe congrès Géol. Intern. Alger, I8 p. I77-I80.

RIVIERE A., PIMIENTA J., RAVAZET-DUBOUL Ch., et VERNHET S. - I952 - Sur la granulométrie de certains sédiments argileux - Interprétation géologique des diagrammes, C.R. Ac. Sc. t. 234, p. 298-300.

RIVIERE A., SALLE C. et Melle VERNHET - I95I - Sur certaines anomalies granulométriques apparentes des roches argileuses et leur interprétation géologique G.R. Ac. Sc. t. 253, p. I858.

RIVIERE A., et Melle VERNHET S. - I95I - Sur la sédimentation des minéraux argileux en milieu marin en présence de matières humiques - Conséquences géologiques C.R. Acad. Sc. Paris, t. 233, p. 807-808.

RIVIERE A., et VISSE L. - I954 - L'origine des minéraux des sédiments marins - B.S.G.F., 6ème série, T. IV, p. 467-473.

ROUSSEAU J., MONEK G., et ACHAIN R. - I965 - Contribution à l'étude des corrélations existant entre les caractéristiques géotechniques et géologiques d'une formation meuble - 6ème congrès Int. Méca. Sols et Tvx. Fondations, Montréal, p. II2-II5.

RUTLEDGE P.C. - I944 - Relation of undisturbed sampling to laboratory testing - Trans A.S.C.E., vol. I09, p. II55.

SHEPARD F.P. - I954 - Nomenclature based on sand siltclay ratios - Jour. Sed. Petrology, V. 24, p. I5I-I58.

SKEMPTON A.W.- I944 - Notes on the compressibility of clays - Quart. J. Géol. Soc. London, Vol. C, p. II9-I35.

SKEMPTON A.W.- I950 - A possible relation between true cohesion and the mineralogy of clays - Proc. Second. Intern. Conf. Soil. Mech. 7 p. 45-46.

- - I953a- The colloïdal activity of clay - Proc. Third. Intern. Conf. Soil. Mechan. I, p. 57-6I (I953).

- - I953b- Soil Mechanics in relation to géology - Part. I, Proc. Yorkshive Géol. Soc. 29, p. 33-62.

=-=-= -"Symposium on Atterberg limits" - I960 - A.S.T.M. spécial technical publication nº 254.

TERZAGHI K. - I95I - Mécanique théorique des sols - Dunod.

- - I955 - Influence of géological factors on the engineering properties of sédiments - Econ. Géol. Fiftieth Anniversary Volume, p. 557-6I8.

TERZAGHI K., et PECK R.B. - I957 - Mécanique des sols appliquée aux travaux publics et au bâtiment - Dunod, p. 565.

THEOBALD N., FUSE J., et MERCIER G. - I960 - Contribution à la stratigraphie du Lias dans le Jura franc-comtois - Ann. Sc. Univers. de Besançon, Géologie, fasc. I2, p. 3I-9I.

THIEBAUT L. - I923 - Sur la composition minéralogique de quelques marnes - Bull. Soc. Sc. Nancy, p. 55.

- - I925 - Contribution à l'étude des sédiments argilo-calcaires du Bassin de Paris - Thèses Sciences Nancy, p. I70.

UNIVERSITE DE DIJON - I955 - Etudes granulométriques : analyse mécanique : méthode densimétrique de Bougoucos - Pub. de l'Univ. de Dijon.

URBAIN P. - I935 - Séparation de divers constituants des marnes - C.R. Ac. Sc., t. 20I, p. 92.

- - I937a- Texture microscopique des roches argileuses - Bull. Soc. Géol. Fr., 5ème série, t. 7, p. 34I-352.

- - I937b- Introduction à l'étude pétrographique et géotechnique des roches argileuses - Actualités scientifiques et industrielles, nº 499 et 500 (2tomes).

- - I95I - Comparaison des caractères géologiques et géochimiques de 2 séries de roches argileuses. - Groupe Fr. des argiles, T. IV (suite), p. 63-74.

- - I942 - Logique des roches argileuses - B.S.G.F., 5ème série, T.XII, p. 97-II2.

VARLAN G. - I939 - Caractéristiques physiques et mécaniques des terrains - Application aux terrains de la région parisienne, Thèse sciences, Paris.

VANÇON J.P. - I965 - Reconnaissance géologique des sites de barrages sur le Doubs, la Lure et leurs affluents jurassiens - Thèse de 3ème cycle, Besançon.

VATAN A. - I959 - Les méthodes de laboratoire appliquées à l'étude des sédiments - Mines et Géologie, n° 6, 2ème trim. I959, p. 63-70, Bull. Dir. Mines et Géol. du Maroc.

VERDEYEN J. - I943 - La dénomination et la classification des sols - Bull. de l'A.B.E.M.

- - I952 - Mécanique du sol et fondations - Desoer, Liège p. 580.

VUAGNAT M. - I949 - Granulométrie réelle et granulométrie apparente - Arch. Sc. Physi. et Nat., Vol. 2, fasc. 3, Genève, p. 423-447.

WAIDELICH W.C. - I959 - Influence of liquid and clay mineral type in consolidation of clay - Liquid systems Natl. Acad. Sc., Public. 629, p. 24-42.

WHITE W.A. - I949 - Atterberg plastic limits of clay minerals - Am. Mineralogist, V. 34, p. 508-5I2.

WINTERKORN H.F. - I950 - Engineer properties of clay soils Winterkorn road reseach ins - Bull. I, Princeton, N.J.

INDEX DES LIEUX CITES

D'après la carte topographique au 1/25.000e, coordonnées LAMBERT arrondies à l'hectomètre.

	x	y
Aux têtes (Scierie), N. de Valentin	876,5	260,9
Bois à la Goulotte, E. de Les Rancenières	877,6	26I,7
Boussières, (tranchée).	246,3	870,2
Canal de la Citadelle, sondages sur le tracé:		
1) Avanne (S 1)	874,4	250,7
2) Casanène (S 24, sortie canal)	879,6	253,4
3) Entrée amont du canal de la Citadelle (S 6)	880,8	253,9
4) Velotte (S 10)	879,5	253,6
Chemin Morre - La Chapelle-des-Buis : fondat.	881,6	253,4
Clair Soleil (Fondations)	881,3	256,6
Ecole (Ancienne marnière)	875,5	259,5
Ecole (Marnière exploitée)	875,1	259,1
Epeugney (Ancienne marnière)	880,8	242,1
Grandvillars	947,3	292,8
Lanterne-Vertière (Marnière exploitée)	859,3	253,0
La Tuilerie (Ancienne marnière)	886,3	243,9
Le Grand Treuchot - D.111	881-882	252-253
Le Vernois (Ancienne marnière)	880,7	257,0
Les Clairons - D.104	875,7	247,9
Les Grands Prés - N. de Pugey	876,5	249,6
Moulin Caillet	871,9	245,1
Morre (Tranchée)	882,3	254,1
Palente (Ancienne marnière)	881,4	258,0
Pugey (Tranchée)	876,9	249,3
R.D.111 - N. D'Arguel, (Fondations)	877,4	250,1
R.N.P.67 - Entre Morre et le Trou au Loup	882-883	253-254
R.N.P.73 - (Tranchée de Palente)	880,9	258,0
Rue de la Mouillère	879,6	255,8
Tarcenay (Marnière)	886,5	246,7

T A B L E D E S P L A N C H E S

-----oOo-----

Pl.		Pages
I	- Plan de situation	5
II	- Analyse granulométrique concernant le Charmouthien .	67
III	- Analyse granulométrique concernant le Lias supér....	70
IV	- Analyse granulométrique concernant le Jurassique supérieur	73
V	- Classification des échantillons en familles, en fonction des Wl	I04
VI	- Abaque de conversion d'après HOGENTOGLER	II0
VII	- Conversion des Wl de quelques marnes du Jurassique en fonction de leur granulométrie	III
VIII	- Diagramme de corrélation des valeurs de Wl en fonction des teneurs en Co_3Ca, pour les marnes du Charmouthien	II7
IX	- Diagrammes de corrélation entre Wl et Co_3Ca, pour les marnes du Lias supérieur et du Jurassique sup...	II8
X	- Abaque donnant la relation entre l'indice de plasticité et l'angle de frottement interne, (d'après FREIBERG)	I26
XI	- Abaque de classification des sols combinant le diagramme d'HOGENTOGLER à l'abaque de plasticité de CASSAGRANDE	I32
XII	- Relation entre la limite de liquidité et l'indice de plasticité, pour les sédiments argileux du Charmouthien, du Lias supérieur et du Jurassique supérieur	I34

T A B L E D E S M A T I E R E S

-------oOo-------

		Pages
	INTRODUCTION	1
	SITUATION GEOGRAPHIQUE	3
	PREMIERE PARTIE : ETUDE GEOLOGIQUE Introduction à la géologie de la région de Besançon	4
	ESQUISSE DE L'HISTOIRE MORPHOTECTONIQUE	5
-	STRATIGRAPHIE GENERALE DU JURASSIQUE AUX ENVIRONS DE BESANCON	5
I -	LE LIAS	6
	A - Le Rethien	6
	B - L'Hettangien	8
	C - Le Sinémurien	8
	D - Le Lotharingien	9
	E - Le Charmouthien	9
	F - Le Toarcien	11
	G - L'Aalénien	12
II -	LE JURASSIQUE MOYEN	13
	A - Le Bajocien	14
	B - Le Bathonien	15
III -	LE JURASSIQUE SUPERIEUR	15
	A - Le Callovien	15
	B - L'Oxfordien	16
	C - Le Lusitanien	17
	D - Le Séquanien	19
	E - Le Kimméridgien	21
	F - Le Portlandien	21
-	DONNEES GEOLOGIQUES DES MARNES ETUDIEES	23
I -	ESSAI DE RATIONALISATION DANS LA DETERMINATION DES MATERIAUX ARGILEUX	23
II -	DESCRIPTION MACROSCOPIQUE DES ECHANTILLONS ETUDIES DANS LE CADRE DE LEUR GISEMENT	24
	- LA COMBE LIASIQUE DES MERCUREAUX	24
	- LA REGION VALENTIN-ECOLE-CHATILLON-le-DUC	32
	- LANTENNE-VERTIERE	35

Pages

- LA REGION DU PIC-SAINT LOUP 35
- LE JURASSIQUE SUPERIEUR MARNEUX A BESANCON 36

III - DESCRIPTION MICROSCOPIQUE DES ECHANTILLONS ETUDIES . 40

A - LE LIAS 40
B - LE JURASSIQUE SUPERIEUR 43
C - CONCLUSIONS ET INDICATIONS RELATIVES A LA SEDIMENTATION 46

IV - PROCESSUS PHYSIQUE ET CHIMIQUE DE LA SEDIMENTATION . 46

V - NATURE DE L'ARGILE ET TRANSFORMATIONS 49

VI - MANIFESTATIONS DU REMANIEMENT 50

DEUXIEME PARTIE : ETUDE GEOTECHNIQUE 53

I - INTRODUCTION A L'ETUDE GEOTECHNIQUE D'UN SEDIMENT ARGILEUX 53

II - DEFINITION DES CARACTERISTIQUES PHISICO-CHIMIQUES UTILISEES COMME PARAMETRES 56

III - METHODE D'ECHANTILLONAGE 60

IV - NECESSITE D'UNE CLASSIFICATION DES SEDIMENTS EN VUE DE LEUR UTILISATION GEOTECHNIQUE 62

A - CLASSIFICATION DES SEDIMENTS ARGILEUX JURASSIQUES BASEE SUR LA GRANULOMETRIE 63
1°) Choix des fractions granulométriques 63
2°) Technique de l'analyse granulométrique 64
3°) Sédimentométrie : principe de la méthode ... 64
4°) Expression de l'analyse granulométrique 65
5°) Résultats 66
6°) Conclusions générales concernant la granulométrie des marnes jurassiques 74
7°) Critiques d'une classification basées uniquement sur la granulométrie 75

B - CLASSIFICATION BASEE SUR LA PLASTICITE 76
1°) Généralités 76
2°) Expression des résultats 77
3°) Relations entre les valeurs de la Wl et la nature des métériaux I03
4°) Variations des constantes physiques en fonction des teneurs relatives en argile et en "éléments détritiques" I09
5°) Discussion II3

Pages

C - CLASSIFICATION BASEE SUR L'ANALYSE CHIMIQUE II3
- Calcul de corrélation entre Wl et le pourcentage en Co_3Ca II9
- Hypothèses sur les mécanismes de décalcification I2I

D - CONCLUSIONS RELATIVES AUX CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES I23

V - CARACTERISTIQUES MECANIQUES I24

A - INTRODUCTION I24
I°) Angle de frottement interne I24
2°) Cohésion I27
3°) Compressibilité I28

B - CLASSIFICATION GEOTECHNIQUE DES ECHANTILLONS AU MOYEN DES ABAQUES DE PLASTICITE I28
I°) Abaque de plasticité U.S.C.S. I28
2°) Le diagramme d'HOGENTOGLER I29
3°) Essai de "classification combinée"..... I33

C - ESSAIS OEDOMETRIQUES..... I35
I°) Introduction I35
2°) Théorie I35
3°) Hypothèse sur la pression de consolidation d'un sédiment I35
4°) Expression des résultats I37
5°) Hypothèses consécutives aux résultats des essais I39

TROISIEME PARTIE I4I

- CONSEQUENCES DES ETUDES PRECEDENTES I4I

I - COMPORTEMENT MECANIQUE DES SEDIMENTS MARNEUX ... I4I
I°) Les marnes dessinent une topographie orizont. I4I
2°) Contructions sur talus I42
a) fondations sur puits I43
b) fondations sur pieux I43
c) fondations sur radiers I44
3°) Stabilisation d'un glissement à l'ouverture des fouilles I44

II - COMPARAISON DES ETUDES GEOLOGIQUES ET GEOTECHNIQUES I45

CONCLUSION I46